



SKRIPSI – TK141581

**STUDI KINETIKA ABSORPSI CO₂ KE DALAM LARUTAN
MDEA BERPROMOTOR *ARGININE* DAN *L-GLUTAMIC
ACID* MENGGUNAKAN *WETTED WALL COLUMN***

**Oleh :
Muhammad Haikal
NRP. 2313 100 036**

**Septiani Ayustiningrum
NRP. 2313 100 076**

**Dosen Pembimbing 1:
Prof.Dr.Ir. Ali Altway, M.S
NIP. 19510804 197412 1 001**

**Dosen Pembimbing 2:
Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D
NIP. 19840508 200912 2 004**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**



FINAL PROJECT – TK141581

**KINETICS STUDY OF CARBON DIOXIDE ABSORPTION
REACTION INTO MDEA SOLUTION WITH *ARGININE*
AND *L-GLUTAMIC ACID* PROMOTOR USING *WETTED*
*WALL COLUMN***

**Proposed by :
Muhammad Haikal
NRP. 2313 100 036**

**Septiani Ayustiningrum
NRP. 2313 100 076**

**Dosen Pembimbing 1:
Prof.Dr.Ir. Ali Altway, M.S
NIP. 19510804 197412 1 001**

**Dosen Pembimbing 2:
Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D
NIP. 19840508 200912 2 004**

**CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**

LEMBAR PENGESAHAN

"STUDI KINETIKA ABSORPSI CO₂ KE DALAM LARUTAN MDEA BERPROMOTOR ARGININE DAN L- GLUTAMIC ACID MENGGUNAKAN WETTED WALL COLUMN"

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Departemen Teknik
Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

Muhammad Haikal
Septiani Ayustiningrum

2313 100 036
2313 100 076

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S. (Pembimbing 1)
2. Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D (Pembimbing 2)
3. Fadilatul Taufany, S.T., Ph.D. (Penguji I)
4. Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. (Penguji II)
5. Dr. Kusdianto, S.T., MSc.Eng. (Penguji III)



STUDI KINETIKA ABSORPSI CO₂ KE DALAM LARUTAN MDEA BERPROMOTOR ARGININE DAN L- GLUTAMIC ACID MENGGUNAKAN WETTED WALL COLUMN

Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S.
Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D

Disusun oleh : Muhammad Haikal (2313100036)
Septiani Ayustiningrum (2313100076)

ABSTRAK

Absorpsi karbon dioksida (CO₂) merupakan hal yang penting dalam dunia industri. Dalam industri, khususnya industri petrokimia, minyak, dan gas alam pada prosesnya diperlukan pemisahan gas CO₂ dimana gas ini merupakan gas yang korosif (*acid gas*). Maka penting dilakukan proses pemisahan CO₂ dari aliran gas, salah satu caranya adalah absorpsi reaktif menggunakan pelarut *methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor. Maka, dilakukan penelitian ini untuk memperoleh data kinetika reaksi absorpsi CO₂ dalam larutan MDEA dengan menggunakan promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid*. *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* dipilih karena merupakan senyawa asam amino yang reaktif, sehingga dapat mempercepat laju reaksi MDEA. Metode yang digunakan adalah absorpsi menggunakan peralatan *wetted wall column* skala laboratorium pada tekanan 1 atm. Dari penelitian ini didapatkan informasi mengenai data kinetika reaksi sebagai upaya untuk mengoptimalkan proses pemisahan CO₂ di dunia industri. Hasil yang didapat dari penelitian ini menunjukkan peningkatan temperatur operasi meningkatkan laju absorpsi CO₂. Semakin tinggi temperatur operasi maka laju absorpsi akan semakin meningkat. Selain itu, penambahan promotor kedalam larutan MDEA dapat meningkatkan laju absorpsi CO₂ secara signifikan.

Semakin banyak penambahan promotor maka laju absorpsi akan semakin meningkat. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* sebagai promotor dapat menambah laju absorpsi CO₂ pada larutan MDEA dan mampu menutupi kelemahan larutan MDEA. Maka, didapatkan persamaan konstanta laju reaksi absorpsi CO₂ dari penelitian ini adalah $k_{\text{Arginine}} = 4.55 \times 10^{15} \exp(-7647.202/T)$ (sistem MDEA-*Arginine-L-Glutamic Acid*), $k_{\text{L-Glutamic Acid}} = 6.92 \times 10^{14} \exp(-7110.423/T)$ (sistem MDEA-*Arginine-L-Glutamic Acid*), $k_{\text{Arginine}'} = 1.78 \times 10^{14} \exp(-6629.138/T)$ (sistem MDEA-*Arginine*), $k_{\text{L-Glutamic Acid}'} = 1.09 \times 10^{13} \exp(-5857.554/T)$ (sistem MDEA-*L-Glutamic Acid*), dan $k_{\text{MDEA}} = 1.14 \times 10^{16} \exp(-9567.053/T)$ (sistem MDEA) (m³/kmol.det).

Kata kunci: absorpsi, CO₂, promotor, wetted wall column

KINETICS STUDY OF CARBON DIOXIDE ABSORPTION REACTION INTO MDEA SOLUTION WITH *ARGININE* AND *L-GLUTAMIC ACID* PROMOTOR USING WETTED WALL COLUMN

Advisors : Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S.
Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D

Proposed by : Muhammad Haikal (2313100036)
Septiani Ayustiningrum (2313100076)

ABSTRACT

Carbon dioxide (CO₂) absorption is the important part in industrial.. Particularly in petrochemical, oil and gas industries, as the most contributed in CO₂ releasing, need to remove the CO₂ gas since it was the acid and corrosive gas. Since the importance of CO₂ removal from gas stream, the use of methyldiethanolamine (MDEA) with promotor is chosen as the way for reactive absorption. Thus the experiment proposed to find the CO₂ absorption kinetic velocity in MDEA solution using *Arginine* and *L-Glutamic Acid* promotor. *Arginine* and *L-Glutamic Acid* are chosen since they are reactive amino acid thus rising the CO₂ absorption kinetic velocity in MDEA solution. The chosen method for this experiment was absorption using wetted Wall Column in a laboratorium scale with 1 atm pressure. The purpose of this experiment was to find out the reaction kinetic data in order to optimize the CO₂ separation process in industrial world. The result from this experiment shows the increasing of operating temperature impact on the increasing of CO₂ absorption kinetic velocity. The addition of promotor in MDEA solution will significantly increase the CO₂ absorption velocity. CO₂ absorption velocity is getting faster along with more promotor addition in solution. The result also shows the addition of *Arginine* and *L-*

Glutamic Acid mixture as promotor will increase the CO₂ absorption velocity in MDEA solution and adequate to cover the weakness of MDEA absorption velocity. From the experiment and data calculation, the constants equation of CO₂ absorption kinetic velocity result were $k_{\text{Arginine}} = 4.55 \times 10^{15} \exp(-7647.202/T)$ (sistem MDEA-Arginine-L-Glutamic Acid), $k_{L-\text{Glutamic Acid}} = 6.92 \times 10^{14} \exp(-7110.423/T)$ (sistem MDEA-Arginine-L-Glutamic Acid), $k_{\text{Arginine}'} = 1.78 \times 10^{14} \exp(-6629.138/T)$ (sistem MDEA-Arginine), $k_{L-\text{Glutamic Acid}'} = 1.09 \times 10^{13} \exp(-5857.554/T)$ (sistem MDEA-L-Glutamic Acid), dan $k_{\text{MDEA}} = 1.14 \times 10^{16} \exp(-9567.053/T)$ (sistem MDEA) (m³/kmol.det).

Keywords : Absorption, CO₂, promotor, wetted wall column

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah Subhana Wa Ta'ala yang telah memberikan kekuatan sehingga kami dapat menyelesaikan Laporan Skripsi yang berjudul :

“STUDI KINETIKA ABSORPSI CO₂ KE DALAM LARUTAN MDEA BERPROMOTOR ARGININE DAN L- GLUTAMIC ACID MENGGUNAKAN WETTED WALL COLUMN”

Tugas Laporan Skripsi ini merupakan salah satu syarat kelulusan Program Studi S-1 di Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pada kesempatan kali ini, kami menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Ali Altway M.S. selaku Dosen Pembimbing dan Kepala Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
2. Ibu Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
3. Bapak Juwari, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya.
4. Bapak Fadlilatul Taufany, ST., Ph.D selaku Sekretaris Departemen Akhir Departemen Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya.
5. Bapak dan Ibu Dosen pengajar serta seluruh karyawan Departemen Teknik Kimia.
6. Orang tua dan saudara-saudara kami serta teman - teman, atas doa, bimbingan, perhatian, dan kasih sayang yang selalu tercurah selama ini.

Kami menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan ini, yang membutuhkan saran yang konstruktif demi penyempurnaannya.

Surabaya, Juli 2017

Penyusun

DAFTAR ISI

COVER	
LEMBAR PERSETUJUAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Perumusan Masalah	4
I.3 Batasan Masalah	4
I.4 Tujuan Penelitian	4
I.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
II.1 Bahan Baku (CO ₂)	6
II.2 Teknologi Pemisahan CO ₂	8
II.3 Pemilihan Pelarut dan Promotor	11
II.4 Kinetika Reaksi Absorpsi CO ₂	15
II.5 Absorpsi CO ₂ dalam WWC	17
II.6 Penelitian Terdahulu	19
BAB III METODE PENELITIAN	21
III.1 Deskripsi Penelitian	23
III.2 Rancangan Percobaan	22
III.2.1 Penetapan Variabel	22
III.2.2 Analisis Sampel	22
III.3 Bahan dan Alat yang Digunakan	22
III.3.1 Bahan yang Digunakan	22
III.3.2 Alat yang Digunakan	26
III.4 Langkah Percobaan	27
III.4.1 Tahap Persiapan Bahan dan Peralatan Percobaan	27
III.4.2 Tahap Pelaksanaan Percobaan Absorpsi CO ₂	30

III.4.3 Analisa Sampel	31
III.4.4 Evaluasi Data	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	37
IV.1 Pengaruh Kenaikan Temperatur Terhadap Laju Absorpsi CO ₂	37
IV.2 Pengaruh Konsentrasi Promotor Terhadap Laju Absorpsi CO ₂	41
IV.3 Kereaktifan Promotor pada Absorpsi CO ₂	43
BAB V KESIMPULAN	51
DAFTAR PUSTAKA	xviii
DAFTAR NOTASI	xxiv
APPENDIKS A	A-1
A.1 Menentukan Keadaan Steady State	A-1
A.2 Analisa Data	A-1
A.3 Evaluasi Data	A-3
APPENDIKS B	B-1
B.1 Hasil Analisa Menggunakan CO ₂ - <i>Analysis</i> <i>Method</i>	B-1
B.2 Hasil Perhitungan [OH ⁻] dan [CO ₂ ⁻] _e	B-7
B.3 Nilai Konstanta Henry	B-11
B.4 Hasil Perhitungan Diffusivitas	B-11
B.5 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa	B-12
B.6 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s)	B-16
B.7 Hasil Perhitungan k_{MDEA} , $k_{[OH^-]}$ dan k_{app}	B-20
B.8 Hasil Perhitungan Rezim	B-21
APPENDIKS C	C-1
C.1 Data Gas inlet	C-1
C.2 Data Mol Gas Terabsorp	C-1
C.3 Data % Recovery	C-1
C.4 Grafik %Recovery	C-3

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Struktur kimia (a) MDEA, (b) <i>L-Glutamic Acid</i> , dan (c) <i>Arginine</i>	14
Gambar II.2 Distribusi kecepatan <i>Wetted Wall Colum</i> (WWC)	18
Gambar III.1 Rancangan Penelitian	21
Gambar III.2 Skema Alat <i>Wetted Wall Column</i>	28
Gambar III.3 Rangkaian Alat WWC	29
Gambar IV.1 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO ₂ dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 1:1	38
Gambar IV.2 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO ₂ dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 1:2	39
Gambar IV.3 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO ₂ dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 2:1	39
Gambar IV.4 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO ₂ dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 0:1	40
Gambar IV.5 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO ₂ dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 1:0	40
Gambar IV.6 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO ₂ dengan komposisi 1% 0:1 dan 1% 1:0	42
Gambar IV.7 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO ₂ dengan komposisi 5% 0:1 dan 1% 1:0	43
Gambar IV.8 Hubungan nilai k dengan T(K) pada absorpsi CO ₂ dalam MDEA dan promotor yang diperoleh dari penelitian ini dengan sistem MDEA-promotor pada temperatur 303.15 – 323.15 K	47

- Gambar IV.9 Hubungan nilai k dengan T(K) pada absorpsi CO₂ dalam MDEA berpromotor yang diperoleh dari penelitian ini dengan sistem MDEA-Arginine-L-Glutamic Acid pada temperatur 303.15 – 323.15 K 48
- Gambar IV.10 Hubungan nilai k dengan T(K) pada absorpsi CO₂ dalam MDEA penelitian ini dan literatur pada temperatur 303.15 – 323.15 K 49
- Gambar IV.11 Hubungan nilai k dengan T(K) pada absorpsi CO₂ dalam berbagai pelarut dan promotor yang diperoleh dari penelitian ini dan literatur pada temperatur 303.15 – 323.1 K 50
- Gambar C.1 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO₂ dengan variasi % berat promotor komposisi 1:1 pada suhu 303.15 – 323.15 K C-3
- Gambar C.2 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO₂ dengan variasi % berat promotor komposisi 1:2 pada suhu 303.15 – 323.15 K C-3
- Gambar C.3 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO₂ dengan variasi % berat promotor komposisi 2:1 pada suhu 303.15 – 323.15 K C-4
- Gambar C.4 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO₂ dengan variasi % berat promotor komposisi 0:1 pada suhu 303.15 – 323.15 K C-4
- Gambar C.5 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO₂ dengan variasi % berat promotor komposisi 1:0 pada suhu 303.15 – 323.15 K C-5

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Karakteristik Fisik CO ₂	6
Tabel II.2 Spesifikasi batas konsentrasi gas CO ₂ dalam proses industri	8
Tabel II.3 Sifat-sifat Fisik MEA, DEA, dan MDEA	12
Tabel II.4 Perbandingan MEA, DEA, dan MDEA	13
Tabel II.5 Penelitian terdahulu	19
Tabel IV.1 Perbandingan persamaan konstanta laju reaksi absorpsi CO ₂ pada berbagai macam pelarut dan promotor	46
Tabel A.1 Data pengukuran pH larutan setiap waktu	A-1
Tabel A.2 Data Perhitungan k_{app} Prediksi Untuk Suhu 303.15 K	A-14
Tabel A.3 Data $k_{Arginine}$ setiap suhu	A-15
Tabel A.4 Data $k_{L-Glutamic\ Acid}$ setiap suhu	A-15
Tabel B.1 Data Perhitungan [CO ₃ ²⁻] dan [HCO ₃ ⁻] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi B-1 promotor <i>Arginine</i> dan <i>L-Glutamic Acid</i> 1:1	B-1
Tabel B.2 Data Perhitungan [CO ₃ ²⁻] dan [HCO ₃ ⁻] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi B-2 promotor <i>Arginine</i> dan <i>L-Glutamic Acid</i> 1:2	B-2
Tabel B.3 Data Perhitungan [CO ₃ ²⁻] dan [HCO ₃ ⁻] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi B-2 promotor <i>Arginine</i> dan <i>L-Glutamic Acid</i> 2:1	B-2
Tabel B.4 Data Perhitungan [CO ₃ ²⁻] dan [HCO ₃ ⁻] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi B-3 promotor <i>Arginine</i> dan <i>L-Glutamic Acid</i> 0:1	B-3
Tabel B.5 Data Perhitungan [CO ₃ ²⁻] dan [HCO ₃ ⁻] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi B-3 promotor <i>Arginine</i> dan <i>L-Glutamic Acid</i> 1:0	B-3
Tabel B.6 Data Perhitungan [CO ₃ ²⁻] dan [HCO ₃ ⁻] pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi B-4 promotor <i>Arginine</i> dan <i>L-Glutamic Acid</i> 1:1	B-4

- Tabel B.7 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi B-4 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2
- Tabel B.8 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi B-5 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1
- Tabel B.9 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi B-5 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1
- Tabel B.10 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi B-6 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0
- Tabel B.11 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada MDEA 40% berat B-6
- Tabel B.12 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi B-7 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1
- Tabel B.13 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi B-7 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2
- Tabel B.14 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi B-7 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1
- Tabel B.15 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi B-8 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1
- Tabel B.16 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi B-8 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0
- Tabel B.17 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi B-8 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1
- Tabel B.18 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi B-9 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2

- Tabel B.19 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi B-9 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1
- Tabel B.20 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi B-9 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1
- Tabel B.21 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi B-10 promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0
- Tabel B.22 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada MDEA 40% berat B-10
- Tabel B.23 Data Perhitungan Konstanta Henry Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 K – 323.15 K B-11
- Tabel B.24 Hasil Perhitungan Diffusivitas Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 – 323.15 K B-11
- Tabel B.25 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Sisi Gas Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 - 323.15 K B-12
- Tabel B.26 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K B-12 untuk 1% berat promotor komposisi 1:1
- Tabel B.27 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K B-13 untuk 1% berat promotor komposisi 1:2
- Tabel B.28 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K B-13 untuk 1% berat promotor komposisi 2:1
- Tabel B.29 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K B-13 untuk 1% berat promotor komposisi 0:1
- Tabel B.30 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K B-14 untuk 1% berat promotor komposisi 1:0

- Tabel B.31 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K B-14 untuk 5% berat promotor komposisi 1:1
- Tabel B.32 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K B-14 untuk 5% berat promotor komposisi 1:2
- Tabel B.33 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K B-15 untuk 5% berat promotor komposisi 2:1
- Tabel B.34 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K B-15 untuk 5% berat promotor komposisi 0:1
- Tabel B.35 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K B-15 untuk 5% berat promotor komposisi 1:0
- Tabel B.36 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K B-16 untuk 40% berat MDEA
- Tabel B.37 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 1% B-16 berat promotor komposisi 1:1
- Tabel B.38 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 1% B-17 berat promotor komposisi 1:2
- Tabel B.39 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 1% B-17 berat promotor komposisi 2:1
- Tabel B.40 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 1% B-17 berat promotor komposisi 0:1
- Tabel B.41 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 1% B-18 berat promotor komposisi 1:0

- Tabel B.42 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 5% B-18 berat promotor komposisi 1:1
- Tabel B.43 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 5% B-18 berat promotor komposisi 1:2
- Tabel B.44 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 5% B-19 berat promotor komposisi 2:1
- Tabel B.45 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 5% B-19 berat promotor komposisi 0:1
- Tabel B.46 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 5% B-19 berat promotor komposisi 1:0
- Tabel B.47 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 40% B-20 berat MDEA
- Tabel B.48 Hasil Perhitungan k_{MDEA} dan $k_{[OH^-]}$ pada Temperatur 303.15-323.15 K
- Tabel B.49 Hasil Perhitungan kapperence konsentrasi 1% berat promotor pada Temperatur 303.15 - B-20 323.15 K
- Tabel B.50 Hasil Perhitungan kapperence konsentrasi 5% berat promotor pada Temperatur 303.15 - B-21 323.15 K
- Tabel B.51 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 1% berat promotor komposisi 1:1 pada Temperatur B-21 303.15 -323.15 K
- Tabel B.52 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 1% berat promotor komposisi 1:2 pada Temperatur B-22 303.15 -323.15 K
- Tabel B.53 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 1% berat promotor komposisi 2:1 pada Temperatur B-22 303.15 -323.15 K

- Tabel B.54 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 1% berat
promotor komposisi 0:1 pada Temperatur B-22
303.15 -323.15 K
- Tabel B.55 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 1% berat
promotor komposisi 1:0 pada Temperatur B-23
303.15 -323.15 K
- Tabel B.56 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 5% berat
promotor komposisi 1:1 pada Temperatur B-23
303.15 -323.15 K
- Tabel B.57 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 5% berat
promotor komposisi 1:2 pada Temperatur B-23
303.15 -323.15 K
- Tabel B.58 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 5% berat
promotor komposisi 2:1 pada Temperatur B-24
303.15 -323.15 K
- Tabel B.59 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 5% berat
promotor komposisi 0:1 pada Temperatur B-24
303.15 -323.15 K
- Tabel B.60 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 5% berat
promotor komposisi 1:0 pada Temperatur B-24
303.15 -323.15 K
- Tabel B.61 Hasil Perhitungan Rezim 40% berat MDEA pada Temperatur 303.15 -323.15 K B-25
- Tabel C.1 Data Mol Gas Terabsorb untuk Konsentrasi 1%
berat Promotor pada Suhu 303.15 - 333.15 K C-1
(kmol/det)
- Tabel C.2 Data Mol Gas Terabsorb untuk Konsentrasi 5%
berat Promotor pada Suhu 303.15 - 333.15 K C-1
(kmol/det)
- Tabel C.3 Data Mol Gas Terabsorb untuk MDEA pada suhu 303.15 - 333.15 K C-1
- Tabel C.4 %Recovery CO₂ untuk Konsentrasi 1% berat
promotor pada suhu 303.15 - 333.15 K C-2
- Tabel C.5 %Recovery CO₂ untuk Konsentrasi 5% berat
promotor pada suhu 303.15 - 333.15 K C-2

Tabel C.6 % Recovery CO₂ untuk MDEA pada suhu 303.15 C-2
- 333.15 K

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Proses absorpsi gas ke dalam cairan sering dijumpai dalam dunia industri, seperti pada industri amoniak, *petroleum chemical plants*, dan gas alam. Tujuan dari proses absorpsi dalam industri adalah untuk memisahkan komponen dari campuran gas atau untuk menghasilkan suatu produk reaksi, dan salah satu komponen dari campuran gas yang sering dipisahkan adalah gas karbon dioksida (CO_2).

Gas CO_2 dapat merusak bagian perpipaan dan utilitas pabrik karena sifat korosivitasnya. Sifat korosif CO_2 akan muncul pada daerah dimana terdapat penurunan temperatur dan tekanan, seperti pada bagian *elbow* pipa, *tubing*, *cooler*, dan injektor turbin. Selain itu, gas CO_2 juga dapat mengurangi nilai kalor dari gas alam. Dimana dalam fasilitas turbin, CO_2 akan mengakibatkan penurunan nilai kalor panas akibat CO_2 dan H_2O merupakan produk dari pembakaran. Pada LNG (*Liquified Natural Gas*), gas CO_2 harus dihilangkan, karena dapat membeku pada temperatur rendah yang mengakibatkan penyumbatan pada system perpipaan dan tubing pada *heat exchanger*. Pada industri amoniak, CO_2 merupakan racun pada katalis sintesa amoniak, oleh karena itu CO_2 harus dipisahkan sebelum memasuki unit sintesa amoniak (Tan, 2012).

Melihat besarnya kerugian yang dapat ditimbulkan oleh gas CO_2 , maka penting dilakukan proses pemisahan gas CO_2 dari aliran gas. Rao dan Rubin (2002), mengemukakan ada beberapa teknologi untuk memisahkan dan menangkap CO_2 , seperti: proses absorpsi secara fisik dan kimia, proses adsorpsi, proses *cryogenic* (pendinginan), teknologi membran, dan menggunakan sistem alga atau mikroba. Teknologi pemisahan CO_2 yang ekonomis, telah dikembangkan dengan baik dan telah diaplikasikan pada berbagai proses komersial adalah proses absorpsi secara kimia.

Proses absorpsi kimia merupakan proses pemisahan gas menggunakan pelarut dengan reaktan yang dapat bereaksi dengan komponen gas yang terlarut. Penggunaan pelarut kimia dimaksudkan untuk meningkatkan pelarut dalam menyerap gas CO₂. Beberapa solvent yang sering digunakan pada absorpsi reaktif yaitu Ammonia dan *Potassium carbonate* (K₂CO₃), dimana ammonia memiliki kekurangan yaitu membutuhkan suhu absorber kurang dari 60°C untuk mencegah terbentuk *ammonium bicarbonate* dan mempunyai volatilitas yang tinggi sehingga mudah menguap (Olajire, A.A., 2010). Sedangkan K₂CO₃ korosif terhadap *carbon steel* dan membutuhkan promotor senyawa amine seperti *piperazine* atau pelarut dengan temperatur tinggi (lebih dari 75°C) untuk meningkatkan laju perpindahan massa CO₂ (Faiz, R. Dkk., 2011). Selain itu, senyawa alkanolamine seperti *diisopropanolamine* (DIPA), *2-Amino-2-methyl-1-propanol* (AMP), *monoethanolamine* (MEA), *diethanolamine* (DEA), *methyldiethanolamine* (MDEA) juga sering digunakan untuk mengabsorpsi CO₂. Masing-masing solvent tersebut juga masih memiliki kekurangan.

DIPA memiliki kekurangan yaitu mempunyai kecepatan reaksi yang sedang terhadap CO₂ (Aroonwilas dkk., 2004). AMP memiliki daya absorpsi yang kurang dibandingkan dengan MEA (Abhodeir dkk., 2006). Sedangkan MEA memiliki kekurangan pada daya muat CO₂ yang terbatas, mudah terdegradasi melalui reaksi *irreversible* oleh CO₂ dan O₂, dan memiliki banyak permasalahan pada operasionalnya seperti *foaming*, *fouling*, bertambahnya viskositas serta korosi pada alat. DEA memiliki kekurangan pada daya muat CO₂ yang terbatas dan rentan terhadap korosi dan degradasi. Sedangkan MDEA hanya memiliki kekurangan yaitu rendahnya kinetika absorpsi terhadap CO₂ (Tan dkk., 2012). Selain itu, MDEA memiliki banyak keuntungan, diantaranya adalah memiliki muatan CO₂ yang besar di dalam MDEA dibandingkan dengan MEA dan DEA dengan pengikatan CO₂ menjadi karbonat (Barzagli dkk., 2010), panas yang dibutuhkan untuk reaksi dengan gas asam rendah sehingga

membutuhkan energi yang rendah pada regenerasinya (Dave dkk., 2009), degradasi larutan yang rendah dibandingkan MEA dan DEA (Aroonwilas dkk., 2004), dan tidak korosif terhadap baja karbon (Bishnoi dkk., 2000).

Kekurangan yang ada pada MDEA dapat di rekayasa dengan menambahkan promotor pada larutan MDEA itu sendiri. Penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan Sema dkk. (2012), mempelajari bahwa MDEA yang diberi promotor MEA dapat meningkatkan kinetika reaksinya dengan campuran MDEA-MEA optimum sebesar 23-7 (%berat). Benamor dkk. (2016), mempelajari bahwa campuran MDEA-*Arginine* dapat meningkatkan kinetika reaksi dan menurunkan energi aktivasi karena asam amino mengandung gugus amin yang juga terdapat pada MDEA. Fang dkk. (2014), mempelajari bahwa campuran MEA dengan satu jenis asam amino (proline, sarkosine, glisin, alanin, teonin) dapat meningkatkan kinetika reaksi absorpsi yang ditandai dengan meningkatkan total tekanan pada alat yang digunakan.

Penelitian yang dilakukan oleh Shufeng Shen (2013) yaitu mengenai absorpsi gas CO₂ dalam larutan K₂CO₃ dengan menambahkan promotor *Arginine*. Hasil penelitian ini menunjukkan *activation effect* dari *Arginine* dengan variasi konsentrasi dan suhu mampu meningkatkan kecepatan absorpsi. Pada jurnal J. Van Holst et al (2009) menunjukkan berbagai data kinetika asam amino sebagai promotor, dimana *Arginine* memiliki kinetika paling baik dari asam amino lainnya. Namun *Arginine* dianggap kurang ekonomis karena membutuhkan biaya yang mahal dibandingkan promotor lainnya. Salah satu asam amino yang ekonomis yaitu *L-Glutamic Acid* namun memiliki harga kinetika yang rendah dibandingkan *Arginine*. Pada Penelitian menggunakan kombinasi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* yang diharapkan mampu menjadi alternatif promotor campuran yang lebih ekonomis dengan harga kinetika yang diharapkan.

I.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, dapat dirumuskan suatu masalah yaitu perlunya penambahan promotor pada absorben MDEA untuk dapat meningkatkan kecepatan reaksinya terhadap CO₂. Asam amino terbukti dapat meningkatkan kecepatan reaksi terhadap CO₂ jika ditambahkan sebagai promotor. Sehingga perlu dipelajari efek penambahan campuran dua macam asam amino terhadap kecepatan reaksi absorpsi CO₂ oleh MDEA. Asam amino yang akan digunakan pada percobaan ini adalah *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* dengan komposisi dan kondisi operasi tertentu.

I.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Proses pemisahan CO₂ dilakukan dengan menggunakan campuran gas sintetis (CO₂ dan nitrogen sintetis) dan N₂ sebagai gas inert.
2. Beberapa properti thermodinamika, parameter fisik seperti kelarutan CO₂ dalam *solvent* dan data-data kimia-fisika *solvent* yang digunakan diperoleh dari hasil studi literatur sebelumnya.

I.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mememperoleh data kinetika reaksi absorpsi MDEA dengan kombinasi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid*.
2. Membandingkan kereaktifan absorpsi CO₂ untuk sistem larutan MDEA berpromotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* yang diperoleh dari percobaan ini dengan larutan MDEA berpromotor yang diperoleh dari literatur.

I.5 Manfaat Penelitian

Manfaat Penelitian ini adalah didapatkan informasi mengenai data kinetika reaksi dari absorben MDEA berpromotor campuran *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* pada variabel komposisi campuran tertentu sebagai upaya untuk optimalisasi proses pemisahan CO₂ di dunia industri.

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Bahan Baku (CO₂)

Karbon dioksida (CO₂) adalah senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Berbentuk gas pada temperatur dan tekanan standar dan berada di atmosfer. Gas CO₂ terdapat di atmosfer dalam jumlah kecil yaitu sekitar 370 ppmv. Dalam jumlah yang tidak besar in, gas CO₂ memainkan peran yang sangat penting dalam kehidupan di bumi. Gas CO₂ merupakan gas yang tidak berbau dan berwarna. Gas CO₂ termasuk oksida asam dan tidak berbentuk cair pada tekanan dibawah 5.1 atm tetapi berbentuk padat pada temperatur di bawah -78°C. Dalam bentuk padat, CO₂ disebut *dry ice*. Pada temperatur diatas 31,1°C (pada kondisi diatas 73,9 bar yang merupakan tekanan pada titik kritis), CO₂ dikatakan berada pada kondisi superkritis dimana CO₂ tersebut akan berlaku sebagai gas walaupun pada tekanan yang sangat tinggi. Densitas dari gas tersebut akan sangat besar mencapai atau bahkan melebihi densitas dari air dalam fasa cair.

Tabel II.1 Karakteristik Fisik CO₂

Karakteristik Fisik	Nilai	Satuan
Berat Molekul	44,01	
Temperatur kritis	31,1	°C
Tekanan kritis	73,9	bar
Densitas kritis	467	kg/m ³
Titik Didih (1,103 bar)	-78,5	°C

Fasa Gas:		
Densitas gas (1,013 bar, titik didih)	2,814	kg/m ³
Densitas Gas (STP)	1,976	kg/m ³
Kelarutan di air (STP)	1,716	vol/vol
Fasa Cair:		
Tekanan Uap (20⁰C)	58,5	bar
Densitas Cair (-20⁰C, 19,7 bar)	1032	kg/m ³
Fasa Padat:		
Densitas pada titik beku air	1562	kg/m ³

Sumber: *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, 2000

Gas CO₂ dalam udara murni berjumlah 0,03%, bila melebihi toleransi dapat mengganggu pernapasan. Selain itu, gas CO₂ yang terlalu berlebihan di bumi dapat mengikat panas matahari sehingga suhu bumi panas. Pemanasan global di bumi akibat CO₂ disebut juga sebagai efek rumah kaca. Pemanasan global sudah lama menjadi perbincangan, namun belum juga ada cara yang efektif untuk menghilangkannya atau setidaknya untuk mengurangnya.

Gas CO₂ di produksi hampir 97% dari hasil pembakaran bahan bakar fosil, seperti dari sumber batu bara, minyak, gas alam, dan biomassa. Keberadaan CO₂ pada industri gas alam dapat menurunkan nilai *heating value* pada gas dan komponen asam dapat menyebabkan korosi pada peralatan. Pada pipa gas alam, kandungan CO₂ yang diizinkan sekitar 1-2% mol (Buckingham, 1964; Ma'mun, 2005).

Adanya CO₂ yang berlebihan dapat melubangi lapisan ozon, menyebabkan efek rumah kaca, dan pemanasan global. Salah satu indikator yang digunakan dalam menganalisa isu pemanasan global adalah bertambahnya gas rumah kaca, terutama gas CO₂. Gas CO₂ yang keluar meninggalkan kolom harus memenuhi spesifikasi batas gas CO₂ (**Tabel II.2**).

Tabel II.2 Spesifikasi batas konsentrasi gas CO₂ dalam proses industri

Proses	Batas konsentrasi gas CO ₂
Industri manufaktur	< 0.1% CO ₂
Industri amoniak	< 16 ppm CO ₂
Pemurnian gas alam :	
• Pipa gas	< 1% CO ₂
• Bahan baku LNG	< 50 ppm CO ₂
Sintesa gas untuk produksi kimia (H₂/CO)	< 500 ppm CO ₂
Gasifikasi batu bara	~500 ppm CO ₂
Industri etilen	~1 ppm CO ₂
Pembangkit tenaga listrik :	
• Pembangkit tenaga listrik NGCC	<0.5% CO ₂
• Pembangkit listrik batubara	<1.5% CO ₂

(Yildirim dkk, 2012)

Untuk mempertahankan atmosfer bersih, beberapa cara untuk mengurangi gas CO₂ yakni, melakukan konservasi dan efisien pada semua unit pabrik, Memanfaatkan gas CO₂ yang tersisa misalnya untuk refrigerasi, *dry ice*, dan mereduksi gas CO₂ menjadi produk yang lebih bermanfaat, contohnya methanol.

II.2 Teknologi Pemisahan CO₂

Ada beberapa cara untuk pemisahan CO₂ yang umum digunakan yakni, pemisahan CO₂ menggunakan membran, dengan

metode adsorpsi, distilasi kriogenik, dan teknologi absorpsi. Pemisahan CO₂ menggunakan membran menggunakan prinsip perbedaan permeabilitas antara CO₂ dengan gas yang lain. Sehingga jika campuran gas yang mengandung CO₂ dilewatkan pada membran, maka CO₂ akan lebih cepat lolos melewati membran dan gas yang bersih dari CO₂ akan keluar sebagai produk. Namun teknologi ini mempunyai beberapa kelemahan, yaitu selektivitasnya yang buruk dan penurunan tekanan yang sangat besar. Selektivitas dari membran yang buruk menyebabkan banyak hidrokarbon yang hilang ikut terlewatkan bersama-sama dengan CO₂.

Pemisahan CO₂ dengan adsorpsi menggunakan prinsip penyerapan CO₂ pada permukaan adsorben melibatkan reaksi kimia. Adsorben yang sering digunakan dalam proses ini adalah *Iron Sponge*, *Zinc Oxide*, dan *Molecular Sieve*. Kelebihan dari metode ini ialah cukup baik menangkap H₂S tetapi kurang baik untuk adsorpsi CO₂, Karena efektivitasnya yang buruk. Selain itu, regenerasi dari adsorben ini relatif sulit dan membutuhkan suhu yang tinggi.

Distilasi kriogenik ialah distilasi pada suhu yang sangat rendah, mencapai -180°C. Distilasi kriogenik ini membutuhkan persiapan awal *feed* yang rumit, instalasi unit ini sangat mahal, dan kompresi yang dibutuhkan menyebabkan operasi kompresor besar yang berbiaya tinggi. Pemisahan CO₂ dengan absorpsi ialah metode yang paling sering dijumpai. Absorpsi lebih disukai dalam industri pengolahan gas dibanding teknologi lain Karena memiliki efektivitas tinggi, kualitas produk yang baik, dan relative mudah serta murah jika melihat efektivitasnya. Teknologi absorpsi prinsipnya adalah melarutkan CO₂ dalam pelarut yang sesuai. Perbedaan kelarutan antara gas lain dan CO₂ dalam absorben menyebabkan produk keluaran akan bersih dari CO₂. Untuk dapat mengabsorb CO₂ maka absorben dikontakkan dengan gas mengandung CO₂. Ada beberapa pegontakkan CO₂ dengan pelarut, diantaranya adalah dengan kontaktor kolom dan kontaktor membran. Kontaktor kolom berbentuk seperti kolom tinggi yang

didalamnya berisi media pengontak seperti tray atau packing. Gas yang mengandung CO_2 akan masuk dari bagian bawah kolom absorber dan solven dimasukkan dari atas, sehingga terjadi kontak secara *countercurrent* dan CO_2 akan lurut dalam absorben (Antonius, 2012).

Secara umum, proses absorpsi diawali dengan penyerapan gas ke dalam liquida melalui *interface*. Dikenal dua macam absorpsi, yaitu:

1. Absorpsi fisik

Proses absorpsi atau perpindahan gas (difusi) kedalam absorben tanpa disertai dengan reaksi kimia.

2. Absorpsi kimia

Pada proses ini, perpindahan gas (difusi) disertai dengan reaksi antara gas dan absorben. Reaksi kimia dapat terjadi secara *reversible* dan *irreversible* dengan reaksi orde satu, orde dua dan seterusnya tergantung dari jumlah molekul yang bereaksi yang konsentrasinya berubah sebagai hasil dari reaksi kimia.

Absorpsi disertai dengan reaksi kimia telah mendapatkan perhatian yang serius dalam proses industri kimia. Proses absorpsi reaktif (*Reactive Absorption Processes/ RAP*) adalah proses yang menggabungkan mekanisme reaksi kimia dan absorpsi dalam satu unit. Secara umum, absorpsi reaktif dikenal sebagai penyerapan gas dalam medium *liquid* dengan reaksi kimia. Proses tersebut memiliki beberapa keuntungan, dimana dalam proses tersebut dapat meningkatkan *yield* reaksi dan *selectivity*, mengatasi hambatan termodinamika seperti reduksi dalam konsumsi energi, air, dan pelarut. Oleh karena adanya interaksi antara reaksi kimia dan perpindahan massa dan panas yang cukup kompleks (Gorak, 2005).

Perpindahan massa disertai reaksi kimia terjadi bila dua fasa tak berada dalam kesetimbangan kimia dikontakkan satu sama lain. Fenomena ini terdiri atas beberapa tahap elementer berikut:

- a. Difusi satu reaktan dari badan gas ke bidang batas antar fasa gas-liquida.

- b. Difusi reaktan dari *interface* ke badan fasa liquida.
- c. Reaksi kimia di dalam fasa liquida.
- d. Difusi reaktan yang semula ada di dalam badan fasa liquida dan/atau produk reaksi didalam fasa liquida, akibat gradien konsentrasi yang terbentuk oleh reaksi kimia.

Proses perpindahan massa perlu disertai reaksi kimia untuk meningkatkan laju dan *yield* proses. Model-model perpindahan massa yang dijelaskan di muka dapat digunakan untuk mempelajari pengaruh reaksi kimia terhadap proses absorpsi. Kendatipun model-model tersebut bervariasi dalam menyajikan proses yang terjadi, seluruh model ini pada umumnya memberikan hasil perhitungan matematik yang bermanfaat dan umumnya lebih disukai untuk menggunakan model yang paling sederhana untuk suatu persoalan tertentu dari pada model yang paling realistis tapi kompleks.

II.3 Pemilihan Pelarut dan Promotor

Pemilihan pelarut umumnya dilakukan sesuai dengan tujuan absorpsi, antara lain:

- Jika tujuan utama adalah untuk menghasilkan larutan yang spesifik, maka pelarut ditentukan berdasarkan sifat dari produk
- Jika tujuan utama adalah untuk menghilangkan kandungan tertentu dari gas, maka ada banyak pilihan pelarut. Misalnya air, dimana merupakan pelarut yang paling murah dan sangat kuat untuk senyawa polar.

Terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan jenis pelarut, yaitu kelarutan gas, volatilitas, korosivitas, harga, ketersediaan, viskositas, dan lain sebagainya.

Pelarut yang paling banyak digunakan pada proses absorpsi CO_2 adalah *alkanolamine*, dimana terbuat dengan menggantikan satu, dua atau tiga atom hidrogen pada dengan molekul ammonia untuk membentuk amina primer, sekunder, dan tertier. Karena senyawa amina dapat bereaksi dengan CO_2 membentuk senyawa kompleks (ion karbonat) dengan ikatan kimia yang lemah. Ikatan kimia ini mudah terputus dengan pemanasan

sehingga regenerasi absorben dapat dengan mudah terjadi (Wang et.al, 2003). Selain senyawa alkanolamine, pelarut yang dapat digunakan pada proses absorpsi CO₂ adalah air dan NaOH. Namun, senyawa tersebut tidak se-efektif senyawa amina dalam menyerap CO₂. Pelarut kimia yang lainnya adalah K₂CO₃ yang digunakan untuk menghilangkan H₂S dan CO₂ pada gas. Tetapi pelarut ini tidak diterima secara massal oleh industri (Servatius, 2012).

Alkanolamine dapat diklasifikasikan menjadi tiga berdasarkan struktur kimianya, yaitu *primary amine*, *secondary amine* dan *tertiary amine*. *Primary amine* memiliki satu rantai alkanol dan dua atom hidrogen yang terikat atom nitrogen, contohnya adalah *Methylethanolamine* (MEA). *Secondary amine* memiliki dua rantai atom alkanol dan satu atom hidrogen yang terikat atom nitrogen, contohnya adalah *Diethanolamine* (DEA) dan *Triethanolamine* (TEA). *Tertiary amine* tidak memiliki atom hidrogen, secara langsung terikat atom nitrogen, contohnya adalah *Methyldiethanolamine* (MDEA) (Wang dkk, 2011; Yildirim dkk, 2012). Pelarut ini dapat digunakan sebagai pelarut tunggal maupun campuran. Untuk sifat-sifat masing-masing tipe alkanolamine dapat dilihat pada **Tabel II.3** dan untuk perbandingan masing-masing tipe alkanolamine dapat dilihat pada **Tabel II.4**

Tabel II.3 Sifat-sifat Fisik MEA, DEA, dan MDEA

Sifat Fisik	MEA	DEA	MDEA
Tekanan Uap, Pa (20 ⁰ C)	25	0,01	1
Massa Jenis (kg/m ³)	1012	1090	1043
Normal Boiling Point (⁰ C)	171	269	247

Sumber: Huntsman, 2007; Frauenkron, 2002

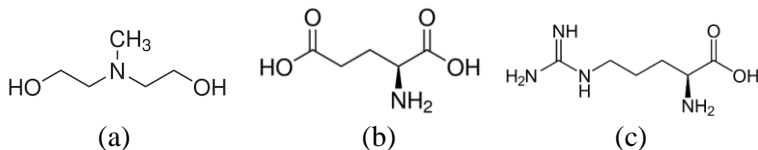
Tabel II.4 Perbandingan MEA, DEA, dan MDEA

Keterangan	MEA	DEA	MDEA
Harga	Paling Ekonomis	Tidak terlalu mahal	Paling mahal diantara MEA dan DEA
Sifat Korosif	Paling Korosif diantara DEA dan MDEA	Korosif	Tidak Korosif
Penyerapan terhadap CO₂	Kurang efektif dalam menyerap CO ₂ diantara DEA dan MDEA	Paling Efektif dalam menyerap CO ₂	Reaksi dengan CO ₂ berjalan lambat sehingga kurang efektif

Penelitian ini menggunakan larutan MDEA dengan promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid*. Larutan MDEA digunakan karena memiliki beberapa keuntungan yaitu energi yang dibutuhkan kecil, kapasitas penyerapan dan stabilitas yang tinggi. Namun larutan MDEA ini memiliki kekurangan yaitu kecepatan reaksi yang rendah. Maka dari itu digunakan *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* sebagai promotor. Penggunaan promotor ini dapat menaikkan laju reaksi tanpa menghilangkan keuntungan dari penggunaan larutan MDEA itu sendiri.

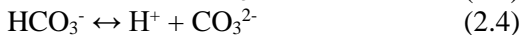
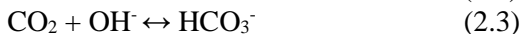
L-Glutamic Acid adalah asam α -amino dengan rantai samping karboksilat. *L-Glutamic Acid* adalah asam amino *non-essential* yang sangat dibutuhkan oleh tubuh. *Arginine* adalah suatu asam amino esensial yang memiliki kelompok guanidium bermuatan positif. *Arginine* mengandung grup amino primer dan guanidium grup pada rantai sampingnya. Amino grup primer (*Arginine*) dan amina tersier (MDEA) diprediksi dapat bereaksi dengan CO₂ dengan cara yang sama. Berikut adalah struktur kimia

dari MDEA ($\text{CH}_3\text{N}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2$), *L-Glutamic Acid* ($\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}_4$) dan *Arginine* ($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}_2$)



Gambar II.1 Struktur kimia (a) MDEA, (b) *L-Glutamic Acid*, dan (c) *Arginine*

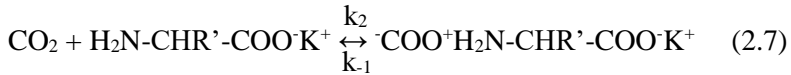
Reaksi antara MDEA dan CO_2 dapat ditulis sebagai berikut (Teerawat Sema, 2012):



Asam amino terbagi menjadi tiga keadaan fisik yakni asam, *zwitterionic* dan basis atau deprotonasi. Untuk keadaan asam dan *zwitterionic* asam amino kurang reaktif terhadap CO_2 dari pada keadaan deprotonasi. Asam amino yang terlarut dalam air berada dalam keadaan *zwitterionic* dengan amino yang terprotonasi. Deprotonasi asam amino dapat dilakukan dengan menambahkan basa kuat sesuai dengan jumlah equimolarnya. Basa yang digunakan umumnya KOH dimana berdisosiasi penuh terhadap air. Adapun deprotonasi dari *zwitterion* asam amino dapat ditulis sebagai berikut (Hendy Thee, 2013):



Beberapa peneliti (Holst dkk, 2009; Vaidya dkk, 2010; Kim dkk, 2012; Paul dan Thomsen, 2012; Kumar dkk, 2003; Jing dkk, 2012) menunjukkan reaksi antara CO_2 dan asam amino yang telah diprotonasi.



Reaksi ini diikuti dengan penghilangan proton oleh suatu basa, B. Pada system ini seperti $\text{KR}'\text{NH}_2$, OH^- , H_2O , dan asam amino yang telah diprotonasi.

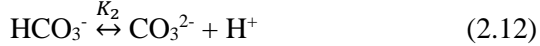
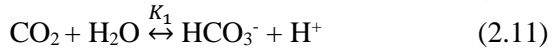


II.4 Kinetika Reaksi Absorpsi CO_2

- Ketika CO_2 terserap dalam larutan MDEA (R_3N) maka akan terjadi reaksi stoikiometri sebagai berikut (Haimour dan Sandall, 1984).



Di dalam larutan terjadi reaksi-reaksi kesetimbangan sebagai berikut.



Dimana,

$$K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-] \quad K_1 = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{CO}_2]}; \quad K_2 = \frac{[\text{CO}_3^{2-}][\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]};$$

$$K_3 = \frac{[\text{R}_3\text{NH}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2][\text{R}_3\text{N}]}; \quad \text{dan} \quad K_4 = \frac{[\text{R}_3\text{NH}^+]}{[\text{R}_3\text{N}][\text{H}^+]}$$

- Dari reaksi kesetimbangan diatas, dapat ditentukan nilai $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ sebagai berikut (Yi dkk, 2009):

$$[\text{OH}^-] = \frac{K_W}{K_2} \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} \quad (2.15)$$

$$[\text{CO}_2]_e = \frac{K_2 K_4}{K_3} \frac{[\text{HCO}_3^-]^2}{[\text{CO}_3^{2-}]} \quad (2.16)$$

- Nilai K_w , K_1 , K_2 , K_3 , dan K_4 didapat dari persamaan berikut :

$$K_w = \exp \left(140,932 - \frac{13445,9}{T} - 22,4773 \right) \quad (2.17)$$

$$K_1 = \exp \left(235,482 - \frac{12092,1}{T} - 36,7816 \ln T \right) \quad (2.18)$$

$$K_2 = \exp \left(220,067 - \frac{12431,7}{T} - 35,4819 \ln T \right) \quad (2.19)$$

(Guo-Wen Xu, 1998; Edwards, 1978)

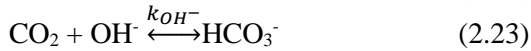
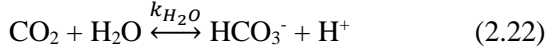
$$K_4 = \frac{1}{10^{(-14,01+0,0184 T)}} \quad (2.20)$$

(Guo-Wen Xu dkk, 1998; Barth, 1984)

Tidak semua konstanta kesetimbangan *independent*, pada kasus ini konstanta kesetimbangan yang *independent* hanyalah K_w , K_1 , K_2 , dan K_4 . Adapun konstanta kesetimbangan K_3 dapat diperoleh dengan persamaan:

$$K_3 = K_1 \times K_4 \quad (2.21)$$

- Langkah – langkah reaksi yang menentukan laju reaksi untuk reaksi (2.9) adalah :



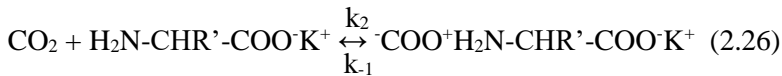
Pada larutan yang memiliki pH > 8, reaksi (2.22) dapat diabaikan, dan reaksi (2.23) yang lebih dominan dan sebagai laju reaksi pembatas (*rate limiting reaction*). Sehingga persamaan laju reaksinya adalah :

$$r_{\text{CO}_2-\text{OH}^-} = k_{\text{OH}^-} [\text{OH}^-] [\text{CO}_2] \quad (2.24)$$

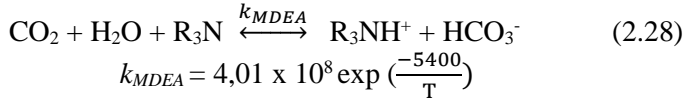
$$\log_{10} k_{\text{OH}^-} = 13,635 - \frac{2895}{T(K)} \quad (2.25)$$

(Danckwerts, 1970)

Dapat diketahui dari penelitian yang telah dilakukan oleh Hendy Thee dkk, reaksi antara CO_2 dan asam amino adalah sebagai berikut :



- Dapat diketahui dari penelitian sebelumnya (Ko dan Li, 2000; Pawlak, 2011) bahwa nilai k_{MDEA} sebesar:



- Persamaan laju reaksi *overall* (r_{ov}) dapat didefinisikan sebagai berikut (Shen dkk, 2013):

$$r_{ov} = k_{ov} [CO_2] \quad (2.29)$$

dimana k_{ov} adalah konstanta laju reaksi *overall pseudo first order*

$$k_{ov} = k_{OH^-} [OH^-] + k_{app} [\text{promotor}] + k_{MDEA} [MDEA] \quad (2.30)$$

Maka, dapat didefinisikan pula bahwa :

$$k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-} [OH^-] - k_{MDEA} [MDEA] \quad (2.31)$$

- Kondisi reaksi pada absorpsi CO_2 dalam larutan MDEA berpromotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai bilangan Hatta adalah $3 < Ha < \frac{1}{2} Ei$, dimana (Lin dan Shyu, 2009):

$$Ha = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L} \quad (2.32)$$

Untuk $Ha > 3$, laju absorpsi CO_2 adalah (Danckwerts, 1970; Lin dan Shyu, 1999) :

$$\bar{R} = ([CO_2]_i - [CO_2]_e) \sqrt{D_{AL} k_{ov}} \quad (2.33)$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{[R_3N]}{z [CO_2]_i} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad (2.34)$$

II.5 Absorpsi CO_2 dalam WWC

WWC merupakan kolom yang terdiri dari tabung silinder tegak dimana cairan dimasukkan dari bagian atas dan mengalir sepanjang dinding tabung berupa lapisan tipis (*film*) kemudian keluar pada bagian bawah tabung, seperti yang diilustrasikan pada **Gambar II.2**. Udara dialirkan dari bagian bawah dan keluar dari bagian atas silinder. Ketika *film* telah mencapai kecepatan akhir

distribusinya kecepatan v pada ketinggian x di bawah permukaan adalah (Altway, 2008).

$$U(x) = \frac{3}{2} \left(\frac{v}{\pi d} \right)^{2/3} \left(\frac{g\rho}{3\mu} \right)^{1/3} \left(1 - x^2 \left[\frac{\pi g d \rho}{3\mu v} \right]^{2/3} \right) \quad (2.35)$$

Dimana: U = kecepatan film cairan, v = laju alir volumetrik cairan, d = diameter pipa yang dialiri cairan, g = percepatan gravitasi, ρ = densitas cairan, μ = viskositas cairan

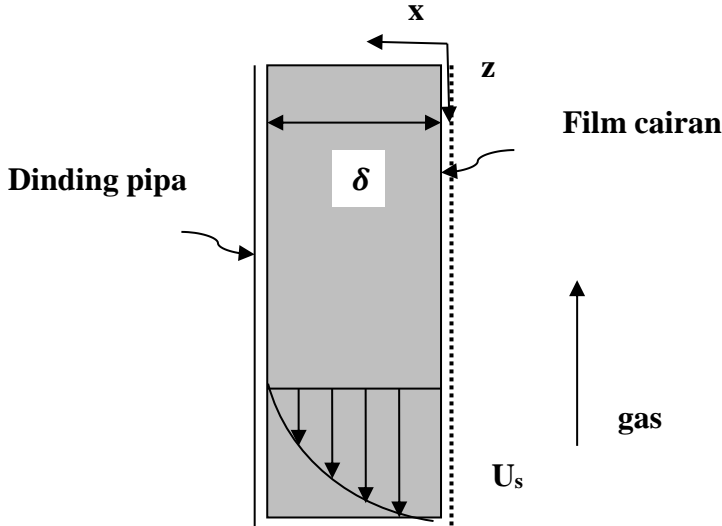
Kecepatan U adalah 0 pada permukaan dinding pipa, dimana $x = \delta$ (δ = tebal *film*), maka $\delta = \left[\frac{3\mu v}{\pi g d \rho} \right]^{1/3}$ (2.36)

Sehingga persamaan (2.35) dapat ditulis:

$$U = U_s (1 - x^2 / \delta^2) \quad (2.37)$$

Kecepatan U_s pada permukaan ($x = 0$) adalah

$$U_s = \frac{3}{2} \left(\frac{v}{\pi d} \right)^{2/3} \left(\frac{g\rho}{3\mu} \right)^{1/3} \quad (2.38)$$



Gambar II. 2 Distribusi kecepatan *Wetted Wall Colum* (WWC)

Dan jika tinggi kolom adalah h dan reaksi dianggap di daerah dekat permukaan, maka waktu kontak gas terhadap permukaan *film* adalah :

$$t = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3} \left[\frac{3\mu}{g\rho} \right]^{1/3} \left[\frac{\pi d}{v} \right]^{2/3} \quad (2.39)$$

Bila $Q(t)$ adalah jumlah gas yang terserap per satuan luas permukaan selama waktu kontak (t), maka laju absorpsi rata-rata selama waktu t adalah $Q(t)/t$. *Film* dianggap sangat tipis, maka area total permukaan yang terbuka sama dengan permukaan pipa sebesar πdh , laju total absorpsi (q) ke dalam *film* menjadi :

$$\frac{Q(t)}{t} = \frac{q}{\pi dh} \quad (2.40)$$

Laju absorpsi (q) dapat dihitung secara eksperimen, dan $Q(t)$ dihitung dari persamaan (2.40), t dihitung dari persamaan (2.35) dan dapat diubah – ubah dengan merubah laju alir (v) atau tinggi kolom (h). Jadi $Q(t)$ dapat ditentukan sebagai fungsi waktu (t) (Altway, 2008).

II.6 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk referensi, seperti yang telah tercantum dalam **Tabel II.5** berikut :

Tabel II.5 Penelitian terdahulu

No	Tahun	Nama Peneliti	Uraian
1	1998	Guo-Wen Xu, Cheng-Fang Zhang, Shu-Jun Qin, et. al.	Equilibrium Gas-Liquid pada CO ₂ -MDEA-H ₂ O dan Efek Piperazine
2	2008	J. van Holst, G.F. Versteeg, D.WF. Brilman, J.A Hogendoorn	Mempelajari studi kinetika untuk CO ₂ dengan beberapa garam asam amino

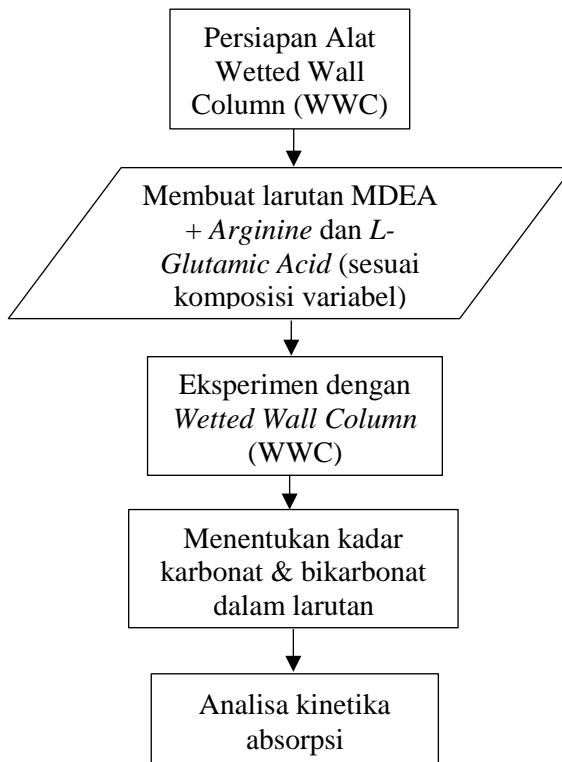
3	2008	Jacco van Holst, Sascha R. A Kersten, dan Kees J. A Hogendoorn	Properti Fisiokimia dari Beberapa Garam Asam Amino Potassium.
4	2010	Hanna Kierzkowska-Pawlak dan Andrzej Chacuk	Kinetika Absorpsi CO ₂ pada Larutan MDEA
5	2012	Teerawat Sema, Abdulaziz Naami, Kaiyun Fu, Muhamed Edali, et.al	Mempelajari perbedaan perpindahan massa dan kinetika reaksi penyerapan CO ₂ pada campuran MDEA-DEA
6	2013	Shufeng Shen, Xiaoxia Feng, Ruihong Zhao, et.al	Mempelajari kinetika penyerapan CO ₂ dengan larutan K ₂ CO ₃ dengan promotor <i>Arginine</i>
7	2013	Mayuri Gupta, Eirik F. da Silva, dan Hallavard F. Svendsen	Mempelajari konstanta ekuilibrium dalam penangkapan CO ₂ dengan amina dan asam amino
8	2013	Babul Prasad, dan Rakesh Kr. Gupta	Mempelajari pengaruh Absorpsi CO ₂ dengan Campuran Amine AMP dan TEPA
9	2015	Hestia dan Arsi	Mempelajari kinetika penyerapan CO ₂ menggunakan larutan DEA berpromotor <i>glycine</i> .

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

BAB III METODE PENELITIAN

III.1 Deskripsi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menentukan data kinetika reaksi absorpsi gas karbon dioksida (CO_2) dalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* menggunakan peralatan *Wetted Wall Column* (WWC) skala laboratorium pada tekanan atmosfer.



Gambar III.1 Rancangan Penelitian

III.2 Rancangan Percobaan

III.2.1 Penetapan Variabel

- Variabel Tetap

1. Tekanan : 1 atmosfer
2. Gas Umpan : campuran 40% CO₂ + 60% N₂
3. Laju alir gas umpan : 6 L/menit
4. Pelarut : Larutan MDEA 40% berat total pelarut
5. Laju alir pelarut : 200 mL/menit
6. Jenis promotor : *Arginine* dan *L-Glutamic Acid*

- Variabel Bebas

Variabel bebas pada penelitian ini adalah suhu operasi, kombinasi dan konsentrasi promotor. Variabel bebas yang dimaksud dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

1. Komposisi promotor campuran (*Arginine* dan *L-Glutamic Acid*) dalam larutan yaitu 1% dan 5% berat dari berat total larutan.
2. Rasio perbandingan berat antara *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* dalam % berat promotor yaitu 1:1, 1:2, 2:1, 0:1 dan 1:0.
3. Suhu operasi yang digunakan yaitu 30°C, 40°C dan 50°C.

III.2.2 Analisis Sampel

Analisa konsentrasi awal dan akhir kandungan karbonat dan bikarbonat dilakukan dengan metode *CO₂-analysis* (Karl Anders Hoff, 2003) menggunakan larutan BaCl₂ dalam mengikat ion karbonat. Selanjutnya dilarutkan dengan HCl dan titrasi menggunakan NaOH dengan indikator dan *metil orange* (MO).

III.3 Bahan dan Alat yang Digunakan

III.3.1 Bahan yang Digunakan

1. Campuran Gas CO₂ 40% *balance* N₂ (Samator Gas, 2017)

2. MDEA

Spesifikasi *Methyldiethanolamine*

Rumus Molekul	: $C_5H_{13}NO_2$
Berat Molekul	: 119,169 gr/mol
Titik Didih	: $247,3^{\circ}C$
Kelarutan dalam air	: 100%
Kemurnian	: 99%
Densitas	: 1,038 gr/mol
Fase	: Liquid

(PT. Pertamina (Persero) Balongan, 2017)

3. *Arginine* (Pro Analisis)

Spesifikasi *Arginine*

Rumus Molekul	: $C_6H_{14}N_4O_2$
Berat Molekul	: 174,2 gr/mol
Kemurnian	: 99%
Keasaman	: 12,488 Pka
Kelarutan dalam air	: 14,87 gr/100 mL ($20^{\circ}C$)
Titik leleh	: $260^{\circ}C$
Titik Didih	: $368^{\circ}C$

(Sigma Aldrich, 2017)

4. *L-Glutamic Acid* (Pro Analisis)

Spesifikasi *L-Glutamic Acid*

Rumus Molekul	: $C_5H_9NO_4$
Berat Molekul	: 147,13 gr/mol
Titik Didih	: $175^{\circ}C$
Kemurnian	: 99%
Titik Leleh	: $213^{\circ}C$

Kelarutan Dalam Air	: 8,57 gr/ lt H ₂ O
Densitas	: 1,46 gr/mol
Keasaman	: 4,07 Pka

(Sigma Aldrich, 2017)

5. Indikator *Phenolphthalein* dan *Metil Orange*

Spesifikasi Metil Orange

Rumus Molekul	: C ₁₄ H ₁₄ N ₃ NaO ₃ S
Berat Molekul	: 327,22 gr/mol
Densitas	: 1,28 gr/mol
Kelarutan Dalam Air	: 0,5 gr / 100 mL

Spesifikasi Phenolphthalein

Rumus Molekul	: C ₂₀ H ₁₄ O ₄
Densitas	: 1,277 gr/mol
Titik Leleh	: 258-263°C
Kelarutan Dalam Air	: 400 mg/lt

(Gudang T. Kimia, 2017)

6. KOH (*Extra pure*)

Spesifikasi Kalium Hidroksida

Rumus Molekul	: KOH
Berat Molekul	: 56,11 gr/mol
Densitas	: 2,044 gr/cm ³
Titik Leleh	: 360°C
Titik Didih	: 1327°C
Kelarutan Dalam Air	: 85 gr/ 100 gr H ₂ O
Kemurnian	: 99%

(SIP, 2017)

7. HCl (Pro Analisis)

Spesifikasi Asam Klorida

Rumus Molekul	:	HCl
Berat Molekul	:	36,458 gr/mol
Tekanan Uap	:	84 mm Hg (20 C)
Titik Didih	:	50,5°C
Kelarutan Dalam Air	:	100%
Keasaman	:	< 1 pKa
Kemurnian	:	99%

(SIP, 2017)

8. NaOH (Pro Analisis)

Spesifikasi Natrium Hidroksida

Rumus Molekul	:	NaOH
Berat Molekul	:	40 gr/mol
Spesifik Gravity	:	2,13
Titik Didih	:	1338°C
Kelarutan Dalam Air	:	100%
pH	:	13,5
Kemurnian	:	99%

(Sigma Aldrich, 2017)

9. BaCl₂ (*Extra Pure*)

Spesifikasi Barium Diklorida

Rumus Molekul	:	BaCl ₂
Berat Molekul	:	208,31 gr/mol
Spesifik Gravity	:	3,9
Titik Didih	:	1560°C
Kelarutan Dalam Air	:	59%

Warna : Putih
Kemurnian : >85%

(SIP, 2017)

10. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Pro Analisis)

Spesifikasi Sodium Borate

Rumus Molekul : $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Berat Molekul : 201,22 gr/mol
Spesifik Gravity : 2,367
Densitas : 381,37 gr/mol
Kelarutan Dalam Air : 59%
Titik Didih : 320 °C
Kemurnian : 99%

(SIP, 2017)

11. $(\text{COOH})_2$ (Pro Analisis)

Spesifikasi Asam Oksalat

Rumus Molekul : $(\text{COOH})_2$
Berat Molekul : 90,04 gr/mol
Spesifik Gravity : 1,9
Warna : Putih
Kelarutan Dalam Air : 1 gr/ 2 ml
Titik Leleh : 189,5 °C
Kemurnian : 99%

(SIP, 2017)

III.3.2 Alat yang Digunakan

1. Rangkaian *Wetted Wall Column* (WWC)
2. *Beaker Glass* & Erlenmeyer
3. Burret & Statif

4. Spatula
5. Pipet Tetes & Pipet Volum
6. Corong Kaca
7. pH meter
8. Kertas saring Whatman
9. Heater
10. Botol Sampel
11. Termometer
12. *Stopwatch*
13. *Stirrer*
14. Neraca Analitik
15. Labu Takar
16. Gelas Ukur

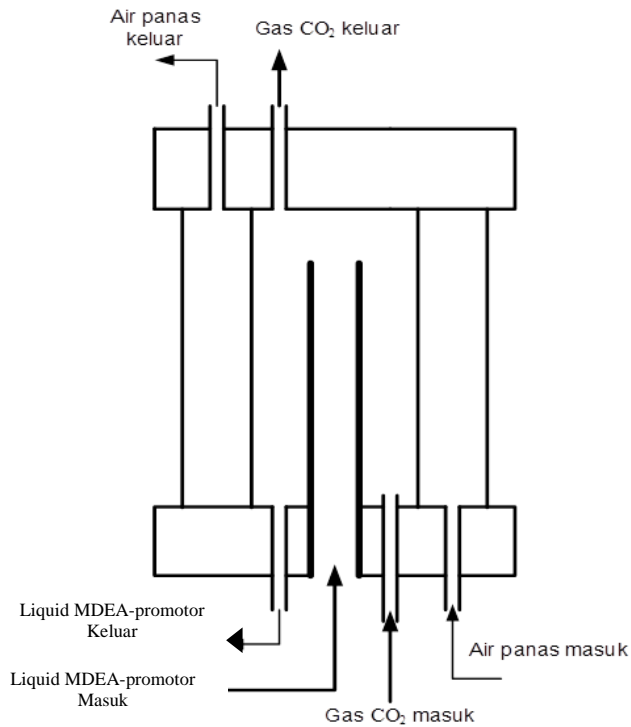
III.4 Langkah Percobaan

Prosedur Percobaan yang akan dilakukan berdasarkan percobaan yang telah dilakukan oleh Altway A., dkk. 2008.

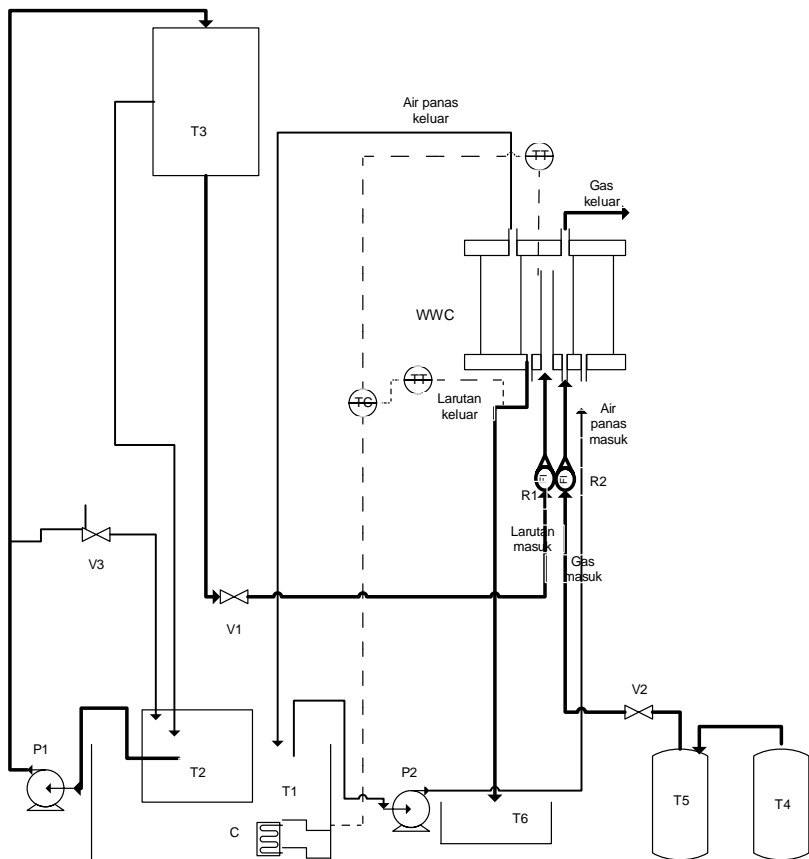
III.4.1 Tahap Persiapan Bahan dan Peralatan Percobaan

- a. Mempersiapkan bahan penelitian, berupa campuran gas CO₂ dan N₂, MDEA, *Arginine*, *Gultamic Acid*, Aquades, indikator PP, indikator MO, KOH, NaOH, HCl, Boraks dan Asam Oksalat.
- b. Menstandarisasi larutan NaOH 0,05 M menggunakan larutan 10 ml asam Oksalat dan indikator 2 tetes *Phenolphthalein*, serta standarisasi larutan HCl 0,1 M menggunakan 10 ml larutan Boraks dan indikator 2 tetes *Methylorange* (MO).
- c. Melarutkan promotor (*Arginine* dan *Glutamic Acid*) dengan aktivator KOH dalam MDEA dan Aquades sesuai variabel.
- d. Mempersiapkan peralatan penelitian, seperti bak penampung larutan MDEA, penampung sampel (ampul), erlenmeyer, heater, termometer, pH meter dan *Stopwatch*.
- e. Merangkai peralatan WWC seperti **Gambar III.3**

- f. Mempersiapkan peralatan analisa berupa buret, erlenmeyer, heater, kertas saring dan corong kaca yang digunakan untuk analisa larutan.
- g. Alat dan bahan siap digunakan.



Gambar III.2 Skema Alat Wetted Wall Column



Gambar III.3 Rangkaian Alat WWC

Keterangan gambar :

- C : Koil pemanas
- P1 : Pompa larutan MDEA berpromotor
- P2 : Pompa air
- R1 : Rotameter cairan
- R2 : Rotameter gas
- T1 : *Waterbath*

T2	: Tangki reservoir (tangki penampung larutan MDEA berpromotor)
T3	: Tangki <i>overflow</i>
T4	: Tangki gas umpan (CO ₂)
T5	: Tabung saturator
T6	: Tangki sampel
TT	: <i>Thermo transmitter</i>
TC	: <i>Thermo control</i>
V1	: <i>Gate valve</i> larutan
V2	: <i>Gate valve</i> CO ₂
V3	: <i>Gate valve (by pass)</i>
WWC	: <i>Wetted wall column</i>

III.4.2 Tahap Pelaksanaan Percobaan Absorpsi CO₂

- Mengisi air ke dalam *waterbath* (T1) sebagai pengatur temperatur dalam jaket WWC.
- Memasukkan larutan MDEA berpromotor ke dalam tangki *reservoir* (T2).
- Mengatur temperatur sesuai dengan variabel.
- Mensirkulasikan air panas pada sisi anulus kolom WWC dan kembali ke *waterbath* (T1).
- Mensirkulasikan larutan MDEA berpromotor menggunakan pompa dari tangki *reservoir* (T2) ke tangki *overflow* (T3) hingga larutan *overflow*.
- Mengatur laju alir larutan MDEA berpromotor, sehingga larutan mengalir dari bawah ke atas melalui bagian dalam *tube* hingga terbentuk lapisan tipis pada permukaan *tube*.
- Pada saat temperatur sistem telah mencapai yang diinginkan dan aliran telah stabil, campuran gas CO₂ dan N₂ dialirkan melewati tangki saturator (T5).
- Kemudian campuran gas CO₂ dan N₂ mengalir dari bawah kolom menuju atas kolom bagian luar pipa *stainless steel* sehingga terjadi kontak antara gas CO₂ dan N₂ dengan lapisan tipis cairan di seluruh permukaan luar *tube* hingga kondisi *steady state*.

- i. Apabila tercapai kondisi *steady state*, mengambil sampel larutan MDEA berpromotor pada tangki penampung sampel (T6) untuk dilakukan analisa kandungan karbonat dan bikarbonat.

III.4.3 Analisa Sampel

Prosedur analisa konsentrasi CO_2 di dalam liquid yang digunakan pada penelitian kali ini menggunakan prosedur analisa konsentrasi CO_2 di dalam liquid pada (Karl Anders Hoff, 2003) :

- a. Menyiapkan 5 ml sampel MDEA akhir yang telah kontak dengan CO_2 di erlenmeyer.
- b. Tambahkan 50 ml NaOH 0,05 M ke dalam sampel dan diaduk hingga homogen.
- c. Tambahkan larutan 25 ml BaCl_2 ke dalam sampel dengan pemanasan di heater hingga suhu maksimum 50°C .
- d. Diamkan hingga terbentuk endapan dan mengendap di dasar erlenmeyer.
- e. Lakukan pemisahan endapan dengan kertas saring *Whatman* dan corong kaca.
- f. Cuci endapan yang tersaring dengan aquadest untuk melarutkan sisa NaOH . Pastikan sudah tercuci dengan sempurna.
- g. Larutkan endapan dengan 20 ml larutan HCl 0,1 M
- h. Panaskan larutan dengan heater selama 2 menit dengan suhu maksimum 50°C .
- i. Tambahkan aquadest hingga volume larutan menjadi 75 ml.
- j. Tambahkan 2 tetes indikator *Methylorange* (MO) ke dalam sampel sehingga berubah warna menjadi merah.
- k. Lakukan titrasi sampel dengan NaOH 0,05 M hingga pH mendekati 7 (warna sampel menjadi kuning).
- l. Catat volume NaOH 0,05 M yang digunakan.

III.4.4 Evaluasi Data

Berdasarkan data hasil eksperimen dan beberapa literatur dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan konstanta laju reaksi berpromotor dengan tahapan sebagai berikut:

- Perhitungan waktu kontak gas-cairan (Danckwerts, 1970):

$$t_c = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3} \left[\frac{3\mu}{g\rho} \right]^{1/3} \left[\frac{\pi d}{v} \right]^{2/3} \quad (3.1)$$

- Perhitungan mol bikarbonat (Karl Anders Hoff, 2003):

$$C_{CO_2} = \frac{(VHCl - Vt - \Delta Vb) \times C \text{ NaOH}}{2 \times V_s} \quad (3.2)$$

$VHCl$ merupakan volume total HCl 0,1 M yang ditambahkan dalam pelarutan endapan. Vt adalah volume $NaOH$ 0,05 M yang dititrasi. Vb adalah selisih volume $NaOH$ 0,05 M yang dititrasi dan HCl 0,1 M yang ditambahkan pada larutan kontrol sampel sebelum kontak dengan CO_2 . (Karl Anders Hoff, 2003).

- Perhitungan jumlah gas yang diserap per satuan luas permukaan selama waktu kontak (t), maka laju rata-rata absorpsi selama t adalah $Q(t)/t$ adalah (Danckwerts, 1970) :

$$\frac{Q(t)}{t} = \frac{q}{\pi d h} \text{ dimana:} \quad q = v \times ([CO_2]_{\text{akhir}} - [CO_2]_{\text{mula}} - \text{mula}) \quad (3.3)$$

- Perhitungan $[OH^-]$ dan $[CO_2]_e$ dari reaksi kesetimbangan menggunakan persamaan (Yi dkk, 2009):

$$[OH^-] = \frac{K_W}{K_2} \frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \quad (3.4)$$

$$[CO_2]_e = \frac{K_2 K_4}{K_3} \frac{[HCO_3^-]^2}{[CO_3^{2-}]} \quad (3.5)$$

- Nilai K_w , K_1 , K_2 , K_3 , dan K_4 didapat dari persamaan berikut:

$$K_w = \exp \left(140,932 - \frac{13445,9}{T} - 22,4773 \ln T \right) \quad (3.6)$$

(Guo-Wen Xu dkk, 1998; Edwards, 1976)

$$K_1 = \exp \left(235,482 - \frac{12092,10}{T} - 36,7816 \ln T \right) \quad (3.7)$$

(Guo-Wen Xu dkk, 1998; Edwards, 1976)

$$K_2 = \exp \left(220,067 - \frac{12431,7}{T} - 35,4819 \ln T \right) \quad (3.8)$$

(Guo-Wen Xu dkk, 1998; Edwards, 1976)

$$K_4 = \left(\frac{1}{10^{(-14,01+0,0184T)}} \right) \quad (3.9)$$

(Guo-Wen Xu dkk, 1998; Barth, 1984)

Tidak semua konstanta kesetimbangan *independent*, pada kasus ini konstanta kesetimbangan yang *independent* hanyalah K_w , K_1 , K_2 , dan K_4 . Adapun konstanta kesetimbangan K_3 dapat diperoleh dengan persamaan:

$$K_3 = K_1 \times K_4 \quad (3.10)$$

- Perhitungan nilai $[CO_2]_i$ didapatkan dengan cara trial k_{ov} , menggunakan persamaan (Altway, 2008) :

$$[CO_2]_i = \frac{k_g P_A + [CO_2]_e \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \quad (3.11)$$

- Nilai koefisien difusivitas dalam gas diperoleh dari persamaan Wilke Chang (Wilke dan Chang, 1955):

$$D_{AG} = \left[\frac{T}{298,15 \text{ K}} \right]^{1,75} \times 0,167 \times 10^{-4} \quad (3.12)$$

- Nilai koefisien difusivitas dalam liquid diperoleh dari persamaan Wilke Chang (Wilke dan Chang, 1955):

$$D_{AL/BL} = 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_B)} \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}} \quad (3.13)$$

- Nilai koefisien perpindahan massa sisi gas (k_g) diperoleh dari persamaan (Cullinane dan Rochelle, 2004) :

$$k_g = \frac{Sh D_{AG}}{R T h} \quad (3.14)$$

dimana,

$$Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{AG}} \quad (3.15)$$

$$V = \frac{4 \times Q_G}{\pi \times d^2} \quad (3.16)$$

$$Re = \frac{\rho_g v h}{\mu_g} \quad (3.17)$$

(Geankoplis, 1993)

$$Sh = 1.075 (Re Sc \frac{d}{h})^{0.85} \quad (3.18)$$

- Data kelarutan di dapat dari persamaan konstanta Henry:

$$\log\left(\frac{He}{He^0}\right) = h_1 I_1 + h_2 I_2 \quad (3.19)$$

$$H_{eT}^0 = H_e^0 298 \exp\left(\frac{-d \ln kH}{d(\frac{1}{T})} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right) \quad (3.20)$$

(Yi dkk, 2009; Weinsenberger dan Schumpe, 1996)

- Data $\left(\frac{-d \ln kH}{d(\frac{1}{T})}\right)$ untuk komponen CO₂ yang diperoleh dari literatur yaitu 2400 K (Sander et al., 1999)

- Menentukan aliran fluida melalui pipa :

$$\delta = \left[\frac{3\mu\vartheta}{\rho g \pi D} \right]^{1/3} \quad (3.21)$$

$$V_{max} = \frac{\rho g \delta^2}{2\pi} \quad (3.22)$$

$$kl = \sqrt{\frac{4 \times D_{AB} \times V_{max}}{\pi h}} \quad (3.23)$$

- Setelah didapatkan nilai $[CO_2]_i$ dari persamaan (3.11), maka nilai k_{ov} dapat ditentukan dari persamaan (Danckwerts, 1970):

$$\varphi = \left(\frac{\frac{Q}{t} \times k_g \times H_e}{k_g P_A - C_{Ae} k_g H_e - \frac{Q}{t}} \right) \quad (3.24)$$

$$\varphi = \sqrt{D_{AL} \times k_{ov}} \quad (3.25)$$

- Menentukan nilai k_{app} dari persamaan dibawah ini

$$k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-} [OH^-] - k_{MDEA} [MDEA] \quad (3.26)$$

dimana:

$$k_{app} = k_{Arginine} [Arginine] + k_{L-Glutamic Acid} [L-Glutamic Acid] \quad (3.27)$$

- Harga k_{OH^-} dan k_{MDEA} diperoleh dari persamaan berikut :

$$\log_{10} k_{OH^-} = 13,635 - \frac{2895}{T} \quad (3.28)$$

(Danckwerts, 1970)

$$k_{MDEA} = 4,01 \times 10^8 \exp\left(\frac{-5400}{T}\right) \quad (3.29)$$

(Ko dan Li, 2000; Pawlak, 2011)

- Konstanta laju reaksi *promotor* ($k_{promotor}$) merupakan fungsi temperatur yang dinyatakan dengan persamaan Arhenius :

$$k_{promotor} = A_{promotor} e^{\frac{-E}{RT}} \quad (3.30)$$

$$\ln k_{promotor} = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (3.31)$$

Keterangan:

- Kondisi reaksi pada absorpsi CO₂ dalam larutan MDEA berpromotor umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai $3 < Ha < \frac{1}{2} Ei$, dimana (Danckwerts, 1970; Lin dan Shyu, 1999):

$$Ha = \frac{\sqrt{k_{ov} \times D_{AL}}}{k_L} \quad (3.32)$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{[R_3N]}{z [CO_2]_i} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad (3.33)$$

BAB IV

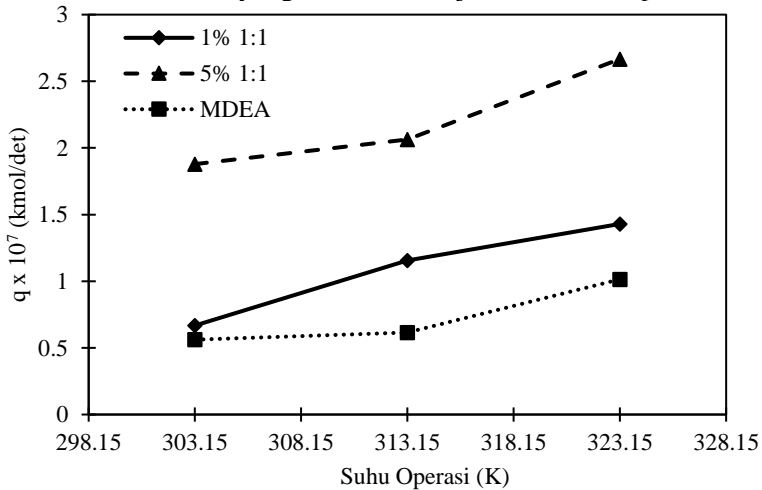
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan data kinetika reaksi absorpsi CO₂ dalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* menggunakan *Wetted Wall Column* (WWC) serta membandingkan kinetika yang didapatkan pada penelitian ini dengan literatur. Penelitian dilakukan pada kondisi operasi tekanan atmosferik dengan variabel temperatur yakni, 303,15 – 323,15 K. Campuran gas yang digunakan adalah 40% CO₂ dan 60% N₂. Sistem larutan terdiri dari larutan 40% berat MDEA dengan variasi konsentrasi promotor 1% dan 5% berat. Promotor terdiri dari *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* dimana pada setiap variasi promotor memiliki variasi *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* dengan komposisi 1:1, 1:2, 2:1, 0:1, dan 1:0. Laju alir larutan dipertahankan pada 200 mL/menit supaya aliran berada dalam kondisi laminar, sehingga lapisan film tipis yang terbentuk tetap berada dalam kondisi *steady state*.

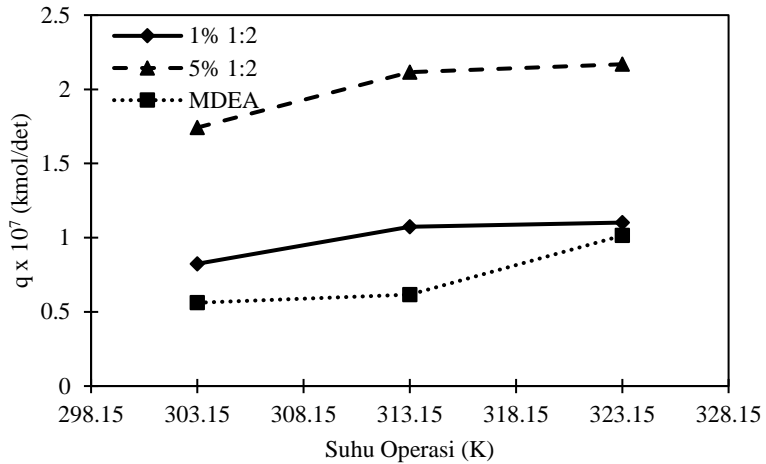
IV.1 Pengaruh Kenaikan Temperatur Terhadap Laju Absorpsi CO₂

Gambar IV.1 hingga **Gambar IV.5** menunjukkan hubungan antara temperatur terhadap laju absorpsi CO₂. Dapat dilihat pada kelima gambar, bahwa semakin meningkatnya suhu maka laju absorpsi CO₂ akan semakin meningkat. Pada **Gambar IV.1** dapat dilihat bahwa untuk konsentrasi promotor 1% berat dengan komposisi 1:1 pada temperatur 303,15 K laju absorpsi CO₂ sebesar $6,67 \times 10^{-8}$ kmol/det. Pada temperatur 313,15 K laju absorpsi CO₂ sebesar $1,15 \times 10^{-7}$ kmol/det (1,7 kali lebih besar). Sedangkan pada temperatur 323,15 K laju absorpsi CO₂ sebesar $1,42 \times 10^{-7}$ kmol/det (2,1 kali lebih besar). Dari Persamaan (3.3), dapat diketahui bahwa laju absorpsi CO₂ (q) dipengaruhi oleh konsentrasi promotor dan temperatur. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Gimeno dkk (2013) bahwa terjadi peningkatan laju absorpsi CO₂ seiring dengan

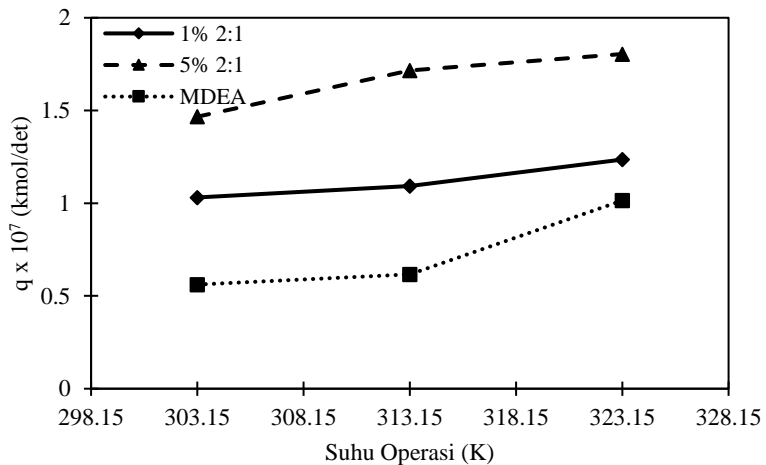
meningkatnya temperatur. Begitu pula dengan penelitian Yih dkk (1987) yang mengatakan bahwa walaupun peningkatan temperatur akan menurunkan kelarutan CO₂ pada pelarut, hal ini juga akan menurunkan viskositas larutan dan meningkatkan laju reaksi kimia sehingga meningkatnya suhu akan berakibat pada peningkatan laju absorpsi CO₂. Hal ini terjadi karena adanya pengaruh dari energi kinetik molekul-molekul zat yang bereaksi. Energi kinetik molekul-molekul zat akan bertambah ketika temperatur dinaikkan, hal ini akan menyebabkan reaksi menjadi semakin cepat. Dikarenakan energi kinetik yang bertambah, maka gerakan molekul-molekul zat yang bereaksi menjadi semakin cepat.



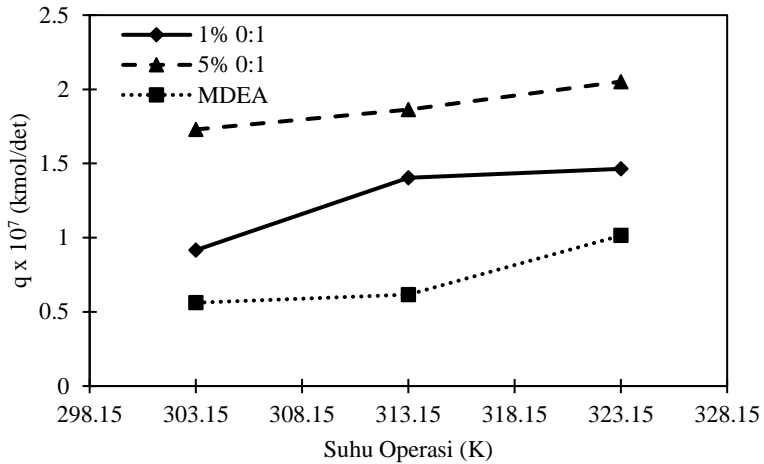
Gambar IV.1 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO₂ dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 1:1



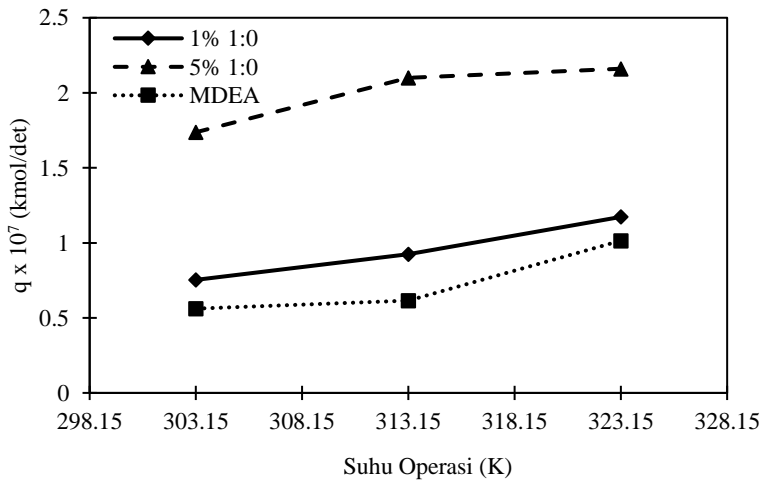
Gambar IV.2 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 1:2



Gambar IV.3 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 2:1



Gambar IV.4 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 0:1



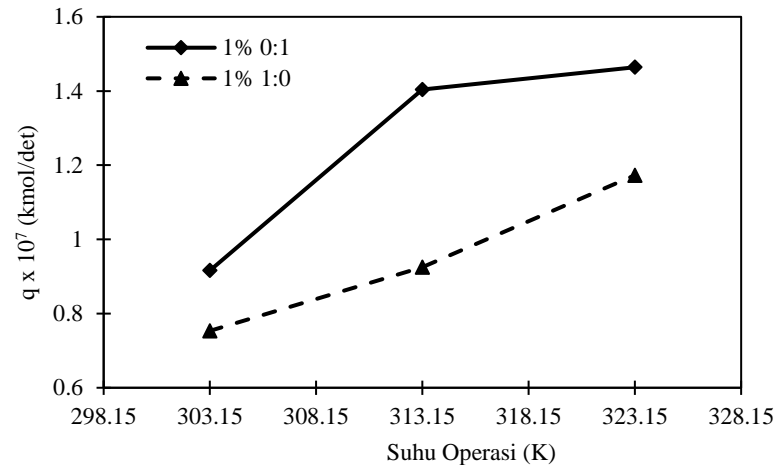
Gambar IV.5 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 1:0

IV.2 Pengaruh Konsentrasi Promotor Terhadap Laju Absorpsi CO₂

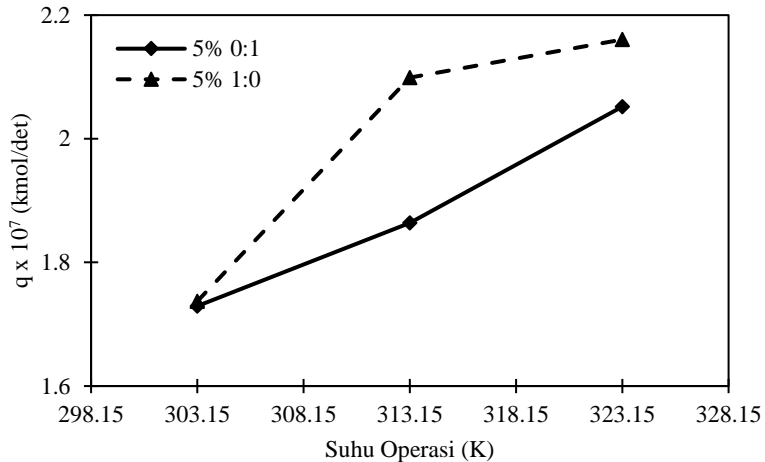
Reaksi antara MDEA dan CO₂ merupakan reaksi eksotermis (Kumar G, 2013) dimana akan menghasilkan panas, reaksi ini dapat dilihat pada Persamaan (2.28). Penggunaan MDEA sebagai bahan utama dalam absorpsi CO₂ memiliki kekurangan, yakni kurang reaktifnya MDEA terhadap CO₂ jika dibandingkan dengan *alkanolamine* yang lain. Kekurangan ini akan disiasati dengan penambahan promotor yang berupa asam amino, dimana sangat reaktif terhadap CO₂. Reaksi antara CO₂ dengan garam asam amino dapat dijelaskan dengan mekanisme zwitterionic yang telah disebutkan pada Persamaan (2.26) dan (2.27). Pada penelitian ini memiliki dua variabel promotor yakni 1% dan 5% berat promotor. Dimana masing-masing variabel memiliki variasi komposisi yakni 1:1, 1:2, 2:1, 0:1, dan 1:0. Pada Gambar IV.1 untuk komposisi 1:1 pada suhu 313,15 K dapat dilihat untuk laju absorpsi CO₂ pada MDEA murni sebesar $6,15 \times 10^{-8}$ kmol/det. Pada konsentrasi 1% berat promotor laju absorpsi CO₂ sebesar $1,15 \times 10^{-7}$ kmol/det (1,8 kali lebih besar). Sedangkan pada konsentrasi 5% berat promotor laju absorpsi CO₂ sebesar $2,06 \times 10^{-7}$ kmol/det (3,3 kali lebih besar). Sesuai dengan penelitian Kuettel (2016) dan Yih (1987) bahwa penambahan promotor akan mempercepat laju absorpsi CO₂. Penambahan asam amino sebagai promotor dikarenakan reaksi MDEA dengan CO₂ berjalan lambat apabila dibanding dengan *alkanolamine* yang lain. Penambahan asam amino ini akan mempercepat laju absorpsi CO₂ karena asam amino memiliki fungsi yang sama seperti *alkanolamine* dalam absorpsi CO₂, dan merupakan amina primer yang sangat reaktif dengan CO₂. Reaksi CO₂ dengan asam amino lebih cepat dan stabil dibandingkan dengan reaksi CO₂ dengan *alkanolamine* (Holst, 2009).

Dapat dilihat pada **Gambar IV.6** bahwa konsentrasi 1% berat *L-Glutamic Acid* memiliki laju absorpsi yang lebih tinggi untuk keseluruhan laju absorpsi dibandingkan dengan *Arginine*. Pada **Gambar IV.7** dengan variabel konsentrasi 5% berat,

Arginine memiliki laju absorpsi yang lebih tinggi untuk keseluruhan laju absorpsi dibandingkan dengan *L-Glutamic Acid*. Perbedaan hasil terbaik dari konsentrasi 1% berat promotor dan 5% berat promotor perlu diteliti lebih lanjut mengenai interaksi antara MDEA dan *Arginine* maupun MDEA dan *L-Glutamic Acid*.



Gambar IV.6 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO₂ dengan komposisi 1% 0:1 dan 1% 1:0



Gambar IV.7 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO₂ dengan komposisi 5% 0:1 dan 5% 1:0

IV.3 Kereaktifan Promotor pada Absorpsi CO₂

Kereaktifan *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* sebagai promotor dalam absorpsi CO₂ dapat ditentukan dari nilai konstanta kecepatan reaksinya. Nilai $k_{arginine}$ dan $k_{L-Glutamic Acid}$ diperoleh dari k_{app} sesuai Persamaan (3.27). k_{app} adalah konstanta kecepatan keseluruhan dari promotor dikali dengan konsentrasi promotornya. Sehingga dapat dilihat dari Persamaan (3.27) peran masing-masing promotor untuk k_{app} itu sendiri. Penentuan kinetika reaksi antara CO₂ dengan garam asam amino dapat dijelaskan dengan mekanisme zwitterionic dan menggunakan rezim reaksi *pseudo-first-order*. Kinetika reaksi dapat ditentukan dari laju absorpsi pada larutan *alkanolamine* berpromotor dengan syarat rezim reaksi *pseudo-first-order* bergantung dengan bilangan Hatta-nya. Bilangan Hatta sebanding dengan *enhancement factor* dengan kondisi sebagai berikut (Shen, 2013):

$$3 < Ha < \frac{1}{2}Ei$$

Pembuktian rezim reaksi pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel B.51** hingga **Tabel B.61**. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi untuk semua variabel memenuhi syarat untuk rezim reaksi *pseudo-first-order*. Sebagai contoh, pada konsentrasi 1% berat komposisi 1:1 temperatur 303.15 K didapatkan Bilangan Hatta sebesar 20.1303 dan $\frac{1}{2}E_i$ sebesar 105.431. Sehingga kondisi tersebut memenuhi syarat untuk rezim reaksi *pseudo-first-order*.

Untuk menentukan parameter kinetika reaksi digunakan metode regresi linier. Regresi linear adalah alat statistik yang dipergunakan untuk mengetahui pengaruh antara satu atau beberapa variabel terhadap satu buah variabel. Variabel yang mempengaruhi sering disebut variabel bebas, variabel independen atau variabel penjelas. Variabel yang dipengaruhi sering disebut dengan variabel terikat atau variabel dependen. Secara umum regresi linear terdiri dari dua, yaitu regresi linear sederhana yaitu dengan satu buah variabel bebas dan satu buah variabel terikat; dan regresi linear berganda dengan beberapa variabel bebas dan satu buah variabel terikat. Pada penelitian ini digunakan regresi linier berganda untuk mendapatkan nilai konstanta laju reaksi promotor. Pada penelitian kali ini akan didapatkan nilai k untuk MDEA murni, *Arginine* dalam sistem campuran, *L-Glutamic Acid* dalam sistem campuran, *Arginine* dalam sistem murni, serta *L-Glutamic Acid* dalam sistem murni. Sistem campuran terdiri dari MDEA, *Arginine* dan *L-Glutamic Acid*. Sedangkan sistem murni terdiri dari MDEA, dan promotor. Nilai k untuk sistem campuran didapatkan dari data semua variabel, sedangkan untuk sistem murni menggunakan data konsentrasi 1% dan 5% berat promotor dengan komposisi 0:1 untuk *L-Glutamic Acid* dan 1:0 untuk *Arginine*, dimana pada penulisan selanjutnya promotor dengan sistem murni akan di tulis sebagai (nama promotor)', contoh: *Arginine*'.

Persamaan umum regresi linear yang digunakan untuk perhitungan k_{app} prediksi sistem campuran adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\sum y_{x1} &= b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 \\ \sum y_{x2} &= b_1 \sum x_1 x_2 + b_2 \sum x_2^2\end{aligned}$$

$$y' = b_1x_1 + b_2x_2$$

Dimana, $y = k_{app}$ eksperimen; $y' = k_{app}$ prediksi; x_1 = konsentrasi *Arginine* (kmol/m³); x_2 = konsentrasi *L-Glutamic Acid* (kmol/m³); $b_1 = k_{Arginine}$; $b_2 = k_{L-Glutamic Acid}$. Dari persamaan linear diatas akan diperoleh nilai k promotor untuk setiap temperatur. Nilai k promotor untuk setiap temperatur ini dikorelasikan menggunakan persamaan *Arrhenius*. Persamaan dapat ditulis sebagai berikut:

$$Y = B + m X_1$$

Dimana,

$$k_{promotor} = A_{promotor} e^{\frac{-E}{RT}}$$

$$\ln k_{promotor} = \ln A - \frac{E}{RT}$$

Maka,

$$Y = \ln k_{promotor}$$

$$B = \ln A$$

$$m = -\frac{E}{R} \text{ dan } X_1 = \frac{1}{T}$$

Dengan menggunakan program aplikasi *Analysis Toolpak –VBA* pada *Microsoft Excel* untuk *Arginine* didapatkan nilai m ($-E/R$) adalah sebesar -7647,202 dan nilai B adalah sebesar 36,054 dengan nilai anti- $\ln B$ sebesar $4,55 \times 10^{15}$, sehingga diperoleh persamaan $k_{Arginine} = 4,55 \times 10^{15} \exp (-7647.202/T)$. Nilai k *L-Glutamic Acid* didapatkan nilai m ($-E/R$) adalah sebesar -7110,423 dan nilai B adalah sebesar 34,171 dengan nilai anti- $\ln B$ sebesar $6,92 \times 10^{14}$, sehingga diperoleh persamaan $k_{L-Glutamic Acid} = 6,92 \times 10^{14} \exp (-7110,423/T)$.

Pada sistem murni persamaan umum regresi linear yang digunakan untuk perhitungan k_{app} prediksi adalah sebagai berikut:

$$y' = \frac{\sum xy}{\sum x^2}$$

Dimana, $y = k_{app}$ eksperimen; $y' = k_{app}$ prediksi atau k promotor; x = konsentrasi promotor (kmol/m³). Dari persamaan linear diatas akan diperoleh nilai k promotor untuk setiap temperatur. Setelah mendapat semua nilai, maka digunakan persamaan *Arrhenius*

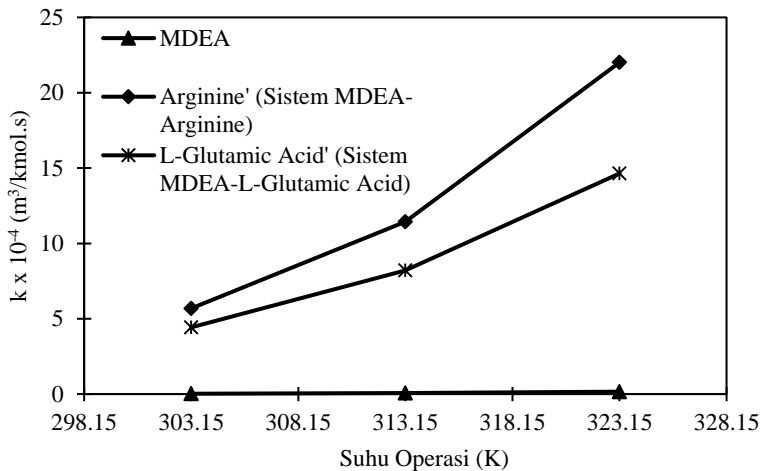
untuk mendapatkan nilai k promotor. Dengan menggunakan program aplikasi *Analysis Toolpak –VBA* pada *Microsoft Excel* untuk *Arginine'* didapatkan nilai m (-E/R) adalah sebesar -6629,138 dan nilai B adalah sebesar 32,815 dengan nilai anti-ln B sebesar $1,78 \times 10^{14}$, sehingga diperoleh persamaan $k_{Arginine'} = 1,78 \times 10^{14} \exp (-6629,138/T)$. Nilai k *L-Glutamic Acid'* didapatkan nilai m (-E/R) adalah sebesar -5857,554 dan nilai B adalah sebesar 30,02 dengan nilai anti-ln B sebesar $1,09 \times 10^{13}$, sehingga diperoleh persamaan $k_{L-Glutamic Acid'} = 1,09 \times 10^{13} \exp (-5857,554/T)$. Nilai k_{MDEA} didapatkan nilai m (-E/R) adalah sebesar -9567,053 dan nilai B adalah sebesar 36,978 dengan nilai anti-ln B sebesar $1,14 \times 10^{16}$, sehingga diperoleh persamaan $k_{MDEA} = 1,14 \times 10^{16} \exp (-9567,053/T)$. Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai kinetika reaksi absorpsi CO_2 kedalam berbagai macam pelarut dan promotor, berikut merupakan tabel perbandingan berbagai macam pelarut dan promotor yang biasa digunakan dalam proses absorpsi CO_2 menggunakan alat WWC:

Tabel IV.1 Perbandingan persamaan konstanta laju reaksi absorpsi CO_2 pada berbagai macam pelarut dan promotor

Pelarut/Promotor	Nilai k ($m^3/kmol.det$)	Referensi
MDEA (Sistem MDEA)	$2.661 \times 10^{11} \exp (-6573/T)$	Haimour dkk, 1987
MDEA (Sistem MDEA-MEA)	$2.58 \times 10^8 \exp (-3736.5/T)$	Ramachandran dkk, 2006
Piperazine (Sistem MDEA-Piperazine)	$2.572 \times 10^{12} \exp (-5211/T)$	Edali M dkk, 2010
Arginine (Sistem K_2CO_3 -Arginine)	$2.58 \times 10^{16} \exp (-8645/T)$	Shen dkk, 2013
Arginine (Sistem MDEA-Arginine- L-Glutamic Acid)	$4.55 \times 10^{15} \exp (-7647.202/T)$	Hasil eksperimen
L-Glutamic Acid (Sistem MDEA-Arginine- L-Glutamic Acid)	$6.92 \times 10^{14} \exp (-7110.423/T)$	Hasil eksperimen

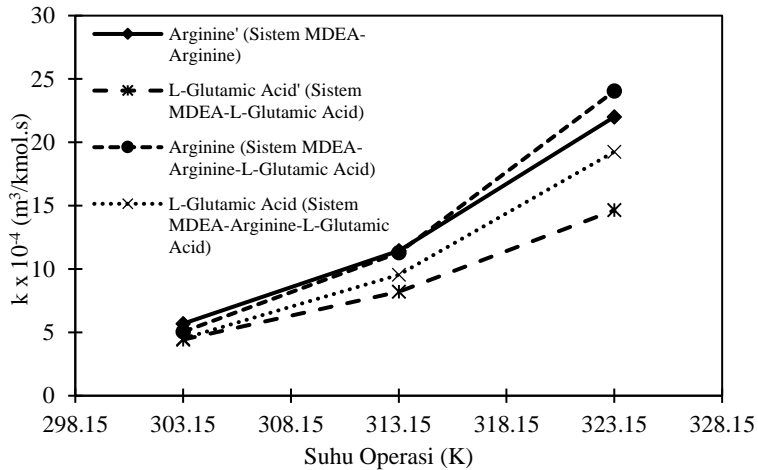
Arginine' (Sistem MDEA-Arginine)	$1.78 \times 10^{14} \exp (-6629.138/T)$	Hasil eksperimen
L-Glutamic Acid' (Sistem MDEA- L-Glutamic Acid)	$1.09 \times 10^{13} \exp (-5857.554/T)$	Hasil eksperimen
MDEA (Sistem MDEA)	$1.14 \times 10^{16} \exp (-9567.053/T)$	Hasil eksperimen

Berikut adalah plot grafik dari berbagai nilai k pada temperatur 303.15 K hingga 323.15 K berdasarkan **Tabel IV.1**:



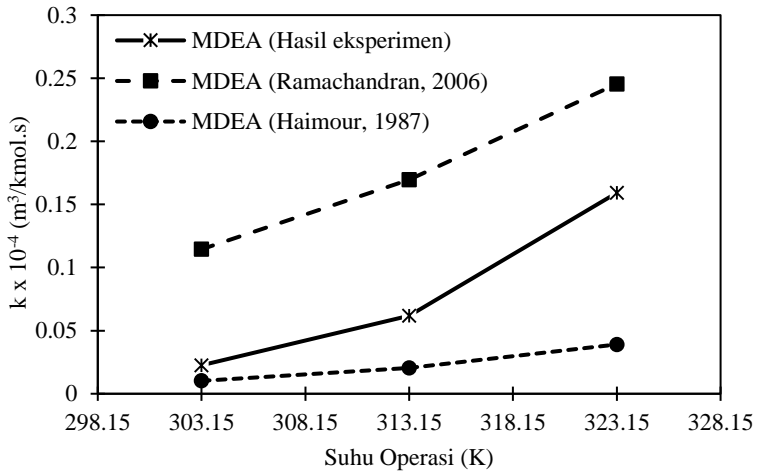
Gambar IV. 8 Hubungan nilai k dengan T(K) pada absorpsi CO₂ dalam MDEA dan promotor yang diperoleh dari penelitian ini dengan sistem MDEA-promotor pada temperatur 303.15 – 323.15 K

Adapun berdasarkan **Gambar IV.8** dapat disimpulkan bahwa nilai $k_{\text{Arginine}'}$ (Sistem MDEA-Arginine) memiliki nilai k paling besar dibandingkan dengan nilai $k_{\text{L-Glutamic Acid}'}$ (Sistem MDEA-L-Glutamic Acid) dan k_{MDEA} (Sistem MDEA) pada sistem MDEA-promotor.



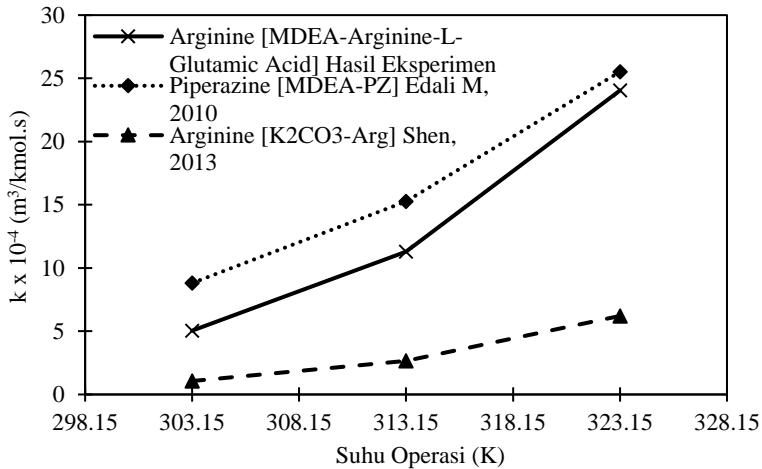
Gambar IV.9 Hubungan nilai k dengan $T(K)$ pada absorpsi CO_2 dalam MDEA berpromotor yang diperoleh dari penelitian ini dengan sistem MDEA-Arginine-L-Glutamic Acid pada temperatur 303.15 – 323.15 K

Adapun berdasarkan **Gambar IV.9** dapat disimpulkan bahwa nilai k_{arginine} (Sistem MDEA-Arginine-L-Glutamic Acid) pada hasil penelitian ini memiliki nilai k paling besar dibandingkan dengan nilai k yang lain dan juga nilai k sistem campuran lebih tinggi dibanding sistem murni.



Gambar IV.10 Hubungan nilai k dengan $T(K)$ pada absorpsi CO_2 dalam MDEA penelitian ini dan literatur pada temperatur 303.15 – 323.15 K

Adapun berdasarkan **Gambar IV.10** dapat dilihat bahwa nilai k_{MDEA} hasil penelitian kali ini memiliki nilai yang hampir sama dengan di literatur.



Gambar IV.11 Hubungan nilai k dengan $T(K)$ pada absorpsi CO_2 dalam berbagai pelarut dan promotor yang diperoleh dari penelitian ini dan literatur pada temperatur 303.15 – 323.1 K

Adapun berdasarkan **Gambar IV.11** dapat dilihat bahwa nilai k_{Arginine} hasil penelitian kali ini memiliki nilai k yang berada dibawah piperazine dan diatas *Arginine* ($\text{K}_2\text{CO}_3\text{-Arginine}$).

BAB V

KESIMPULAN

IV.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian kinetika reaksi absorpsi karbon dioksida (CO₂) kedalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* menggunakan peralatan *Wetted Wall Column* (WWC) dengan konsentrasi MDEA sebesar 40% berat pada temperatur 303.15 K hingga 323.15 K, dapat disimpulkan bahwa :

1. Persamaan kinetika reaksi absorpsi CO₂ (m³/kmol.det) yang didapatkan adalah:
 - $k_{\text{Arginine}} = 4.55 \times 10^{15} \exp (-7647.202/T)$ (sistem MDEA-*Arginine-L-Glutamic Acid*)
 - $k_{\text{L-Glutamic Acid}} = 6.92 \times 10^{14} \exp (-7110.423/T)$ (sistem MDEA-*Arginine-L-Glutamic Acid*)
 - $k_{\text{Arginine}}' = 1.78 \times 10^{14} \exp (-6629.138/T)$ (sistem MDEA-*Arginine*)
 - $k_{\text{L-Glutamic Acid}}' = 1.09 \times 10^{13} \exp (-5857.554/T)$ (sistem MDEA-*L-Glutamic Acid*)
 - $k_{\text{MDEA}} = 1.14 \times 10^{16} \exp (-9567.0532/T)$ (sistem MDEA)
2. Hasil kinetika terbaik yang didapat dari penelitian kali ini adalah nilai kinetika *Arginine* dengan sistem MDEA-*Arginine-L-Glutamic Acid*.

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

DAFTAR PUSTAKA

- Altway, Ali. (2008). *Perpindahan massa disertai reaksi kimia*. Jakarta: Bee Marketer Institut.
- Aroonwilas, A. and Veawab, A. (2004). *Characterization and comparison of CO₂ absorption performance into single and blended alkanolamines in a packed column*, Ind. Eng. Chem. Res, 43: 2228-2237.
- Barth, D., Tondre, C., Lappal, G. And Delpuech, J.J. (1984). *Kinetic study of carbon dioxide reaction with tertiary amines in aqueous solution*, Am. Chem. Soc., 85:3660-3667.
- Barzagli F., Mani F., and Peruzzini M. (2010). *Continuous cycles of CO₂ absorption and amine regeneration with aqueous alkanolamines; a comparison of the efficiency between pure and blended DEA, MDEA and AMP solutions by C-13 NMR spectroscopy*. *Energ Environ Sci*, 3(6): 722-779.
- Benamor, A., Singto, S., Supap, T., Idem, R., Tontiwachuwuthikul, P., Tantayanon, S., and Al-Marri, M.J. (2016). *Synthesis of new amines for enhanced carbon dioxide (CO₂) capture performance : The effect of chemical structure on equilibrium solubility, cyclic capacity, kinetics of absorption and regeneration, and heats of absorption and regeneration*. *Separation and Purification Technology Journal*, 167, 97-107.
- Bishnoi, P.S and Rochelle, G.T. (2000). *Absorption of carbon dioxide into aqueous piperazine: Reaction kinetics, mass transfer and solubility*. *Chem. Eng. Sci.*, 55(22), 5531-5543.
- Buckingham, P., (1964). *Fluor solvent process plants: how they are working*. *Hydrocarbon Process*, 43, 113.
- Cullinane, J.T., and Rochelle, G.T. (2004). *Carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by piperazine*. *Chemical Engineering Science*, 59, 3619-3630.

- Danckwerts, P.V. (1970). *Gas-liquid reactions*. New York: McGraw-Hill.
- Dave, N., Do, T., Puxty, G., Rowland., Feron, P. H. M. And Attalla, M. I. (2009). *CO₂ capture by aqueous amines and aqueous ammonia – A Comparison*, CSIRO Energy Technology, 949-954.
- Edali, M., Idem, R., and Aboudheir, A. (2010). *Kinetic modeling and simulation of carbon dioxide absorption into mixed aqueous solutions of MDEA and PZ in a laminar jet apparatus*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 4, 143-151.
- Edwards, T.J., Maurer, G., Newman, J. and Prausnitz, J.M. (1978). *Vapor-Liquid equilibria in multicomponent aqueous solutions of volatile weak electrolytes*. AIChE J., 24(6), 966-976.
- Faiz R, and Al-Marzouqi M. (2011). *Insights on natural gas purification: Simultaneous absorption of CO₂ and H₂S using MEA in hollow fiber membrane contactors*. Journal of Separation and Purification Technology, 76, 351-361.
- Fang, M. X., Xia, Z.X., Xiang, Q.Y., and Zhou, X.P. (2014) *Experimental study on CO₂ absorption by aqueous ammonia-based blended absorbent*. U.S. National Library of Medicine National Institute of Health, 35(7), 2508-14.
- Frauenkron, M., Melder, Johann-Peter, R. Gunther, R. Rossbacher, and Hoke H,. (2002). *Ethanolamines and propanolamines*. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. BASF Aktiengesellschaft, Ludwigshafen, Germany : John Wiley and Sons, Inc.
- Geankoplis, Christie J. (1997). *Transport processes and unit operations 3rd edition*. New Delhi: Prentice-Hall of India
- Gimeno, M. P., Mayoral, M.C., and Andres, J. M. (2013). *Influence of temperature on CO₂ absorption rate and capacity in ionic liquids*. Zaragoza : ICB-CSIC

- Gorak, A. (2005). *European roadmap for process intensification: reactive absorption*. Ohio: Velocys Inc.
- Gupta, M., Silva, Eirik F. D., Svendsen, and Hallvard F. (2013). *Computational study of equilibrium constants for amines and amino acid for CO₂ with MEA and MDEA as a function of temperature*. Journal of Physical Chemistry B. 117(32).
- Haimour, N., and Sandall, O.C. (1987). *Absorption of carbon dioxide into aqueous Methyl-diethanolamine*. Chemical Engineering Science, 39 (12), 1791-1796.
- Hestia, Maria, dan Arsi, K. (2015). *Studi kinetika absorpsi karbon dioksida menggunakan larutan diethanolamine berpromotor glycine (Skripsi)*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Hoff, K. A. (2003). *Modeling and experimental study of carbon dioxide absorption in a membran contactor*. Norwegian University of Science and Technology, 43(16), 99-101.
- Holst, J.V., Versteeg G.F., Brilman D.W., Brilman, J.A., and Hogendoorn. (2009). *Kinetic study of CO₂ with various amino acid salts in aqueous solution*. Chemical Engineering Science, 64, 59–68.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2002). *IPCC special report on carbon dioxide and storage*. New York: Cambridge University Press
- Jing, G., Zhou, L., and Zhou, Z. (2012). *Characterization and kinetics of carbon dioxide absorption into aqueous tetramethylammonium glycinate solution*. Chem. Eng. J. 181–182, 85–92.
- Ko, J. J. and Li, M. H. (2000). *Kinetics of absorption of carbon dioxide into solutions of N-Methyl-diethanolamine + water*. Chemical Engineering Science, 55(19), 161-175.
- Kuettel, D.A. (2016). *CO₂ absorption rate improvement of an amino acid salt solvent with an inorganic promoter*. Berlin : Technischn Universitat Berlin

- Kumar, G. (2013). *Vapour-liquid Equilibrium of Carbon Dioxide in Newly Proposed Blends of Alkanolamines*. India: National Institute of Technology, Rourkela
- Kumar, P.S., Hogendoorn, J.A., and Versteeg, G.F. (2003). *Kinetics of the reaction of CO₂ with aqueous potassium salt of taurine and glycine*. *AIChE J.*, 49, 203–213.
- Lin, S.H and Shyu, C.T. (1999). *Performance characteristics and modeling of carbon dioxide absorption by amines in a packed column*. *Waste Management*, 19, 255-262.
- Ma'mun, S. (2005). *Selection and characterization of new absorbents for carbon dioxide capture (Doctoral Thesis)*. Norway: Norwegian University of Science and Technology
- Naibaho, A. E. A. (2012). *Absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga menggunakan larutan penyerap campuran senyawa amina (MEA/DEA) : Variasi Komposisi Amina*. Depok: Universitas Indonesia.
- Olajire, A.A. (2010). *CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications*. *Journal of Separation and Purification Technology*, 35(6), 2610-2628.
- Paul, S., and Thomsen, K. (2012). *Kinetics of absorption of carbon dioxide into aqueous potassium salt of proline*. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 8, 169–179.
- Pawlak, H. K., Siemeniec, M., Chacuk, A. (2011). *Reaction kinetics of CO₂ in aqueous methyldiethanolamine solutions using the stopped-flow technique*. *Chemical and Process Engineering*, 33(1), 7-18.
- Prasad, B. and Gupta, M. (2013). *Experimental investigation of CO₂ absorption capacity in amine blend of 2-Amino-2-methyl-1-propanol (AMP) and Tetraethylenepentamine (TEPA)*. Punjab, India: Thapar University
- Ramachandran, N., Aboudheir, A., Idem, R., Tontiwachwuthikul, P. (2006). *Kinetics of absorption of CO₂ into mixed aqueous loaded solutions of*

- Monoethanolamine and Methyldiethanolamine*. Ind. Eng. Chem. Res, 45(8), 2608-2616.
- Rao, A.B., and Rubin, E.S. (2002). *A technical, economic, and environmental assessment of amine-based CO₂ capture technology for power plant greenhouse gas control (Technical Progress Report)*. West Virginia: National Energy Technology Laboratory
- Sema, T. et.al. (2012). *Comprehensive mass transfer and reaction kinetics studies of CO₂ absorption into aqueous solutions of blended MDEA-MEA*. China: Hunan University
- Servatius, B.A. (2012). *Absorpsi gas CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga menggunakan larutan penyerap tunggal dan campuran senyawa amina: pengaruh laju alir CO₂*. Depok: Universitas Indonesia
- Shen, S., Feng, X., and Zhao, R. (2013). *Kinetic study of carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by arginine*. Chemical Engineering Journal, 222, 478-487.
- Tan, Chung-Sung. (2012). *A review of CO₂ capture by absorption and adsorption*. Taiwan: National Tsing Hua University
- Thee, H. et.al. (2013). *A kinetic study of CO₂ capture with potassium carbonate solutions promoted with various amino acids: Glycine, sarcosine and proline*. Australia: The University of Melbourne
- Vaidya, P.D., Konduru, P., Vaidyanathan, M., and Kenig, E.Y. (2010). *Kinetics of carbon dioxide removal by aqueous alkaline amino acid salts*. Ind. Eng. Chem. Res., 49, 11067–11072.
- Wang, M., Lawal, A., and Stephenson, P., (2011). *Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: a state-of-the-art review*. Chemical Engineering Research and Design, 89, 1609-1624.

- Weinsenberger, S. and Schumpe, A. (1996). *Estimation of gas solubilities in salt solutions at temperatures from 273 K to 363 K*. AIChE Journal, 42(1), 298-300.
- Wilke, C. R., and Chang, Pin. (1955). *Correlation of diffusion coefficient in dilute solutions*. AIChE Journal, 1.
- Xu, G.W., Zhang C.F., Qin S.J., Gao W.H., and Liu H.B. (1998), *Gas-liquid equilibrium in a CO₂ – MDEA – H₂O system and the effect of piperazine on it*. Ind. Eng. Chem. Res. 37, 1473–1477.
- Sander Charles R., (1999). *Compilation of Henry's law constants for inorganic and organic species of potential importance in environmental chemistry*. Max Planck Institute of Chemistry Journal, 3, 57.
- Yi Fei, Z., Hai-Kui, C., Guang-Wen, and Shao. Lei. (2009). *Modeling and experimental studies on absorption of CO₂ by benfield solution in rotating packed bed*. Chemical Engineering Journal, 145, 377-384.
- Yih. S.M., and Sun. C.C. (1987). *Simultaneous absorption of hydrogen sulphide and carbon dioxide into potassium carbonate solution with or without amine promoters*. The Chemical Engineering Journal, 34, 65-72.
- Yildirim, O., Kiss A.A., Huser, N., Lessman, K., and Kenig, E.Y. (2012). *Reactive absorption in chemical process industry: a review on current activities*. Chemical Engineering Journal, 1(213), 371-391.

DAFTAR NOTASI

d	Diameter pipa yang dialiri liquida (m)
D_{AG}	Koefisien difusi gas CO ₂ (m ² det ⁻¹)
D_{AL}	Diffusivitas CO ₂ dalam H ₂ O, (m ² det ⁻¹)
D_{BL}	Diffusivitas MDEA dalam H ₂ O, (m ² det ⁻¹)
E	Energi aktivasi (kg m ⁻² det ²)
E_i	<i>Enhancement factor</i>
g	Percepatan gravitasi (m s ⁻²)
h	Tinggi kolom (m)
h	Kekuatan ionic total larutan (m ³ /kmol)
h_+, h_-, h_G	Kontribusi ion positif, negatif dan gas terhadap faktor kelarutan (m ³ kmol ⁻¹)
Ha	Bilangan Hatta
He	Konstanta Henry (Pa m ³ kmol ⁻¹)
He^0	Konstanta Henry untuk sistem gas-cair (Pa m ³ kmol ⁻¹)
I	Kekuatan ionik larutan (ion m ³)
k_{app}	Konstanta reaksi orde satu semu (det ⁻¹)
k_{ov}	Konstanta laju reaksi <i>overall pseudo first order</i> (det ⁻¹)
k_{MDEA}	Konstanta laju reaksi antara MDEA dengan CO ₂ (m ³ kmol ⁻¹ det ⁻¹)
k_{OH-}	Konstanta laju reaksi dari reaksi (2.23) (m ³ kmol ⁻¹ det ⁻¹)
k_{H_2O}	Konstanta laju reaksi dari reaksi (2.22) (det ⁻¹)
k_{arg}	Konstanta laju reaksi untuk <i>arginine</i> (m ³ kmol ⁻¹ det ⁻¹)
k_{app}	Konstanta reaksi orde satu semu antara promotor dan CO ₂ (det ⁻¹)
k_g	Koefisien perpindahan massa sisi gas (kmol m ⁻² det ⁻¹ Pa ⁻¹)
k_L	Koefisien perpindahan massa sisi cairan, (m det ⁻¹)
K_I	Konstanta kesetimbangan ionisasi pertama dari reaksi (2.18) (kmol m ⁻³)

K_2	Konstanta kesetimbangan ionisasi kedua dari reaksi (2.19) (kmol m^{-3})
K_3	Konstanta kesetimbangan ionisasi ketiga dari reaksi (2.21)
K_4	Konstanta kesetimbangan ionisasi keempat dari reaksi (2.20) ($\text{m}^3 \text{ kmol}^{-1}$)
K_w	Konstanta kesetimbangan ionisasi air (2.17) ($\text{kmol}^2 \text{ m}^{-6}$)
M_B	Berat molekul pelarut (kg mol^{-1})
n	Orde reaksi
P_A	Tekanan parsial CO_2 (Pa)
P_{Ai}	Tekanan parsial CO_2 pada <i>interface</i> (Pa)
q	Laju absorpsi total (kmol det^{-1})
Q	Jumlah gas yang terabsorpsi (kmol m^{-2})
r_{ov}	Laju reaksi overall ($\text{kmol m}^{-3} \text{ det}^{-1}$)
R	Konstanta gas ($\text{m}^3 \text{ Pa kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
\bar{R}	Laju absorpsi per satuan luas setelah waktu kontak t ($\text{kmol m}^{-2} \text{ det}^{-1}$)
Re	<i>Reynold number</i>
Sc	<i>Schmidt number</i>
Sh	<i>Sherwood number</i>
t_c	Waktu kontak gas terhadap permukaan (det)
T	Temperatur (K)
U	Distribusi kecepatan film liquid (m det^{-1})
U_s	Kecepatan di permukaan film (m det^{-1})
V_A	Volume molar ($\text{m}^3 \text{ kmol}^{-1}$)
v	Laju alir liquida ($\text{m}^3 \text{ det}^{-1}$)
x	Jarak dari permukaan film cairan (m)
Z_i	Valensi ion
Z	Koefisien mol reaktan yang bereaksi dengan 1 mol gas terlarut

Huruf Latin

δ	Tebal <i>film</i> cairan (m)
ρ	Densitas liquida (kg m^{-3})

μ	Viskositas likuida ($\text{kg m}^{-1} \text{det}^{-1}$)
φ	Parameter asosiasi pelarut

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

APPENDIKS A

A.1 Menentukan Keadaan *Steady State*

Keadaan *steady state* merupakan kondisi dimana tidak ada perubahan pH dan tidak dipengaruhi oleh waktu. Berdasarkan penelitian didapatkan hubungan pH tiap waktunya, sebagai contoh berikut merupakan data pengukuran pH untuk variabel 1% berat 1:1 pada suhu 30°C (303.15 K) seperti yang didapatkan sebagai berikut :

Tabel A.1 Data pengukuran pH larutan setiap waktu

Waktu (menit)	pH
1	10.5
2	10.51
3	10.51
4	10.51

Berdasarkan **Tabel A.1**, diketahui bahwa kondisi *steady state* dicapai pada waktu $t = 3$ menit. Sehingga sampel yang dianalisa yaitu pada menit ke-3 dan selanjutnya. Pengecekan pH dilakukan di setiap variabel hingga mencapai kondisi *steady state* dan kemudian sampel diambil pada menit *steady state* untuk di analisa.

A.2 Analisa Data

Berikut adalah contoh perhitungan hasil eksperimen pada variabel konsentrasi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* (1% berat 1:1), laju alir pelarut 200 mL/menit, laju alir gas (CO_2 40% dan N_2 balance) yaitu 6 mL/menit, dan temperatur 30°C (303.15 K).

Analisa Awal Larutan :

Untuk menganalisa kandungan karbonat dan bikarbonat pada sampel, terlebih dahulu 5 ml sampel ditambahkan dengan 50 ml NaOH 0.05 M untuk mengikat CO_2 dalam bentuk bikarbonat dan karbonat diubah menjadi karbonat. Selanjutnya ditambahkan 25mL BaCl_2 0.5 M ke dalam sampel dengan sedikit pemanasan yaitu <50°C. Penambahan BaCl_2 akan bereaksi dengan CO_3^{2-}

sehingga membentuk endapan putih BaCO_3 . Selanjutnya endapan BaCO_3 disaring dengan kertas Whatman dan dicuci menggunakan aquadest sebanyak 50 ml (hingga tercuci secara sempurna). Kemudian endapan dilarutkan dengan penambahan 20 ml HCl 0.1 M. Selanjutnya dipanaskan pada suhu rendah dan ditambahkan aquadest hingga volume mencapai 75 ml. HCl berlebih dari proses pelarutan dilakukan *back-titration* menggunakan NaOH 0.05 M.

Menentukan mol CO_2 total awal sampel (sebelum kontak dengan CO_2) :

Volume HCl 0.1 M : 20 ml

Volume NaOH 0.05 M pada *Back-titration* : 15.9 ml

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{(\text{VHCl} - \text{Vt} - \Delta \text{Vb}) \times C \text{ NaOH}}{2 \times \text{Vs}}$$

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{(20 \text{ ml} - 15.9 \text{ ml}) \times C \text{ 0.05 M}}{2 \times 5 \text{ ml}}$$

$$C_{\text{CO}_2} = 0.02106 \text{ mol/L}$$

Analisa Akhir Larutan :

Untuk mengetahui mol CO_2 akhir pada sampel MDEA berpromotor yang telah dikontakkan dengan CO_2 .

Volume HCl 0.1 M : 20 ml

Volume NaOH 0.05 M pada *Back-titration* : 12 ml

Menentukan mol bikarbonat akhir :

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{(\text{VHCl} - \text{Vt} - \Delta \text{Vb}) \times C \text{ NaOH}}{2 \times \text{Vs}}$$

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{(20 \text{ ml} - 12 \text{ ml}) \times C \text{ 0.05 M}}{2 \times 5 \text{ ml}}$$

$$C_{\text{CO}_2} = 0.041096 \text{ mol/L}$$

A.3 Evaluasi Data

Menentukan Waktu Kontak :

$$t_c = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3} \left[\frac{3\mu}{g\rho} \right]^{1/3} \left[\frac{\pi d}{v} \right]^{2/3}$$

dimana,

$$h = 0.093 \text{ m}$$

$$\mu_{\text{larutan}} = 0.005813344 \text{ kg/m.s (303.15 K)}$$

$$\rho_{\text{larutan}} = 1040.3 \text{ kg/m}^3 \text{ (303.15 K)}$$

$$d = 0.013 \text{ m}$$

$$v = 200 \text{ ml/menit} = 3.333 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det}$$

$$\pi = 3.14$$

Sehingga waktu kontak antara gas dengan larutan adalah :

$$t_c = \frac{2(0.093 \text{ m})}{3} \left[\frac{3 \left(0.005813344 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \right)}{\left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \left(1040.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} \right]^{1/3} \left[\frac{(3.14)(0.013 \text{ m})}{(3.333 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det})} \right]^{2/3}$$

$$t_c = 0.388839 \text{ detik}$$

Menentukan Laju Absorpsi Gas CO₂ (q) :

$$\text{Laju alir pelarut (v)} = 200 \text{ ml/menit} = 3.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det}$$

$$\text{CO}_2 \text{ mula-mula} = 0.02106 \text{ kmol/m}^3$$

$$\text{CO}_2 \text{ akhir} = 0.041096 \text{ kmol/m}^3$$

Sehingga laju absorpsi gas CO₂ adalah :

$$q = v (\text{CO}_2 \text{ akhir} - \text{CO}_2 \text{ mula-mula})$$

$$q = 3.33 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{detik}} \times \left(\left[0.041096 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \right] - \left[0.02106 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \right] \right)$$

$$q = 6.67808 \times 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{detik}}$$

Menentukan Laju Rata-rata Absorpsi $Q(t)/t$ (Kmol/m².s) (Danckwerts, 1970) :

$$\text{Diameter luas kontak, } d = 0.013 \text{ m}$$

$$\text{Tinggi luas kontak, } h = 0.093 \text{ m}$$

$$\text{Laju Absorpsi, } q = 1.33 \times 10^{-7} \text{ kmol/det}$$

$$\pi = 3.14$$

$$\frac{Q(t)}{t} = \frac{q}{\pi dh}$$

$$\frac{Q(t)}{t} = \frac{6.67808 \times 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{detik}}}{3.14 \times 0.013 \text{ m} \times 0.093 \text{ m}}$$

$$\frac{Q(t)}{t} = 1.75912 \times 10^{-5} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{detik}}$$

Menentukan Konsentrasi Gas CO_2 Terlarut ($[\text{CO}_2]_e$) dan $[\text{OH}^-]$

Menghitung nilai K_W :

$$K_W = \exp \left(140,932 - \frac{13445,9}{T} - 22,4773 \ln T \right)$$

$$K_W = \exp \left(140,932 - \frac{13445,9}{303,15 \text{ K}} - 22,4773 \ln 303,15 \text{ (K)} \right)$$

$$K_W = 1.45329 \times 10^{-14} \text{ kmol}^2/\text{m}^6$$

Menghitung nilai K_1 :

$$K_1 = \exp \left(235,482 - \frac{12092,10}{T} - 36,7816 \ln T \right)$$

$$K_1 = \exp \left(235,482 - \frac{12092,10}{303,15 \text{ K}} - 36,7816 \ln 303,15 \text{ (K)} \right)$$

$$K_1 = 4.63429 \times 10^{-7} \text{ kmol}/\text{m}^3$$

Menghitung nilai K_2 :

$$K_2 = \exp \left(220,067 - \frac{12431,7}{T} - 35,4819 \ln T \right)$$

$$K_2 = \exp \left(220,067 - \frac{12431,7}{303,15 \text{ K}} - 35,4819 \ln 303,15 \text{ (K)} \right)$$

$$K_2 = 5.13134 \times 10^{-11} \text{ kmol}/\text{m}^3$$

Menghitung nilai K_4 :

$$K_4 = \left(\frac{1}{10^{(-14,01 + 0,0184T)}} \right)$$

$$K_4 = \left(\frac{1}{10^{(-14,01 + 0,0184 \times 303,15 \text{ K})}} \right)$$

$$K_4 = 270420741.9 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

Menghitung nilai K_3 :

$$K_3 = K_1 \times K_4$$

$$K_3 = 4.63429 \times 10^{-7} \times 270420741.9$$

$$K_3 = 125.3207$$

Dari reaksi (2.1)

$$[\text{MDEAH}^+] = [\text{HCO}_3^-] = 0.041095 \text{ kmol/m}^3$$

$$[\text{MDEA}]_{\text{in}} = 3.2959432 \text{ kmol/m}^3$$

Mencari $[\text{H}^+]$:

$$[\text{H}^+] = \left(\frac{[\text{R}_3\text{NH}^+]}{[\text{R}_3\text{N}] \times [\text{K}_4]} \right)$$

$$[\text{H}^+] = \left(\frac{[0.041095 \text{ kmol/m}^3]}{[3.2959432 \text{ kmol/m}^3] \times [270420741.9 \text{ m}^3/\text{kmol}]} \right)$$

$$[\text{H}^+] = 4.6108 \times 10^{-11} \text{ kmol/m}^3$$

Maka $[\text{OH}^-]$ adalah :

$$[\text{OH}^-] = \left(\frac{K_w}{[\text{H}^+]} \right)$$

$$[\text{OH}^-] = \left(\frac{1.45329 \times 10^{-14} \text{ kmol}^2/\text{m}^6}{[4.6108 \times 10^{-11} \text{ kmol/m}^3]} \right)$$

$$[\text{OH}^-] = 0.000315191 \text{ kmol/m}^3$$

Trial Karbonat $[\text{CO}_3^{2-}]$ dengan trial K_2 :

$$K_2 \text{ Trial} = \left(\frac{[\text{CO}_3^{2-}] \times [\text{H}^+]}{[\text{CO}_2 \text{ akhir}] - [\text{CO}_3^{2-}]} \right)$$

Trial dilakukan dengan Goal Seek pada Ms. Excel hingga error =0, dimana error :

$$\text{Error} = K_2 - K_2 \text{ Trial}$$

Dari trial K_2 diperoleh, $[\text{CO}_3^{2-}] = 0.021646 \text{ kmol/m}^3$

Dari data $[\text{CO}_3^{2-}] = 0.021646 \text{ kmol/m}^3$, selanjutnya menentukan $[\text{OH}^-]$:

$$[\text{OH}^-] = \frac{K_w}{K_2} \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]}$$

Dimana data $[\text{HCO}_3^-]$ diperoleh dari perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} [\text{HCO}_3^-] &= [\text{CO}_2]_{\text{akhir}} - [\text{CO}_3^{2-}] \\ &= 0.04109589 \text{ kmol/m}^3 - 0.0216458 \text{ kmol/m}^3 \\ &= 0.019450083 \text{ kmol/m}^3 \end{aligned}$$

Maka,

$$[\text{OH}^-] = \frac{K_W [\text{CO}_3^{2-}]}{K_2 [\text{HCO}_3^-]} = \frac{1.45329 \times 10^{-14}}{5.13134 \times 10^{-11}} \times \frac{0.021646}{0.019450083} = 0.000315191$$

Harga $[\text{CO}_2]_e$ dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$[\text{CO}_2]_e = \frac{K_2 K_4 [\text{HCO}_3^-]^2}{K_3 [\text{CO}_3^{2-}]} = \frac{5.13134 \times 10^{-11} \times 270420741.9 \times 0.01945^2}{125.3207 \times 0.021646}$$

$$[\text{CO}_2]_e = 1.93516 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^3$$

Menentukan Konstanta Henry

Harga konstanta Henry didapat dari persamaan berikut :

$$\log\left(\frac{H_e}{H_e^0}\right) = h_1 I_1 + h_2 I_2$$

dimana, H_e^0 adalah konstanta henry untuk sistem gas-cair dan I adalah kekuatan ionic dari larutan yang diperoleh dari :

$$H_e^0 = H_{e298} \exp\left[\frac{-d \ln kH}{d\left(\frac{1}{T}\right)} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right]$$

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2$$

C_i adalah konsentrasi ion – ion yang valensinya Z_i .

$$h = h_+ + h_- + h_G$$

$$h_G = h_{G,o} + h_T(T-298.15)$$

Namun pada pelarut MDEA ini tidak terionisasi sehingga $I=0$

$$\log\left(\frac{H_e}{H_e^0}\right) = 0$$

$$H_e = H_e^0$$

Sehingga,

$$H_{eT}^0 = H_{e298}^0 \exp\left(\frac{-d \ln kH}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right)$$

Harga $\frac{-d \ln kH}{d(\frac{1}{T})}$ diperoleh dari literatur (Sander et al., 2006) yaitu

2400. H_e^0 298 yaitu 3.3×10^{-7} kmol/m³.Pa, sehingga :

$$\begin{aligned} H_{eT}^0 &= 3.3 \times 10^{-7} \exp \left(2400 \times \left(\frac{1}{273.15} - \frac{1}{298} \right) \right) \\ &= 2.88 \times 10^{-7} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \cdot \text{Pa} \\ H_{eT}^0 &= 3.47 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{Pa}}{\text{kmol}} \end{aligned}$$

Menentukan Difusitas CO₂ dan CO₃²⁻

Diffusivitas CO₂ dalam gas N₂ didapat dari Tabel 6.2-1 (Geankoplis, 1993) pada temperatur 298 K sebesar 1.67×10^{-5} m²/det, sehingga perlu dilakukan koreksi temperatur sebagai berikut:

$$\begin{aligned} D_{AG} &= \left[\frac{T}{298,15 \text{ K}} \right]^{1,75} \times 0,167 \times 10^{-4} \\ D_{AG} &= 1.71932 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

Diffusivitas dalam liquid menggunakan persamaan Wilke Chang pada T= 303.15 K (Wilke dan Chang, 1955):

$$D_{AL/BL} = 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_B)} \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}}$$

Dimana

$$\begin{aligned} \varphi &= 2.6 \\ V_A (\text{CO}_2) &= 0.034 \text{ m}^3/\text{kmol} \\ V_A (\text{C}_5\text{H}_{13}\text{NO}_2) &= 0.1489 \text{ m}^3/\text{kmol} \\ M_B &= 18 \text{ kg/kmol} \\ \mu_{\text{air}} &= 0.0008007 \text{ Kg/m.s} \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned} D_{AL} &= 2.31058 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \\ D_{BL} &= 9.52515 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

Menentukan Koefisien Perpindahan Massa Sisi Gas (k_g)

Koefisien Perpindahan Massa sisi Gas (k_g) diperoleh dari persamaan (Cullinane dan Rochelle, 2004) :

$$k_g = \frac{Sh D_{AG}}{R T h}$$

Dari program Hysys, diperoleh data μ dan ρ dengan komposisi 40% CO₂ dan N₂ Balance sebagai berikut :

$$\mu_{\text{gas}} = 1.8038 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$$

$$\rho_{\text{gas}} = 1.319694 \text{ Kg/m}^3$$

$$d = 0.013 \text{ m}$$

$$\text{Laju alir gas, } Q_G = 0.0001 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$h = 0.093 \text{ m}$$

$$\text{- Schmidt number} = Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{AG}}$$

$$Sc = \frac{1.8038 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}}{1.319694 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.71932 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 0.7949658$$

- Kecepatan rata-rata

$$V = \frac{4 \times Q_G}{\pi \times d^2}$$

$$V = \frac{4 \times 0.0001 \text{ m}^3/\text{det}}{3.14 \times 0.013^2 \text{ m}} = 0.753778 \text{ m/s}$$

- Reynold Number = Re

$$Re = \frac{\rho_g v d}{\mu_g}$$

$$Re = \frac{1.319694 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.753778 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.013 \text{ m}}{1.8038 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}} = 716.93905$$

- Sh = Sherwood Number

$$Sh = 1.075 \left(Re Sc \frac{d}{h} \right)^{0.85}$$

$$Sh = 1.075 (716.9305 \times 0.7949658 \frac{0.013 \text{ m}}{0.093 \text{ m}})^{0.85}$$

$$Sh = 44.412569$$

Sehingga,

$$k_g = \frac{Sh D_{AG}}{R T h}$$

$$k_g = \frac{44.412569 \times 1.71932 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}{8314 \frac{\text{m}^3 \text{Pa}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \times 303.15 \text{ K} \times 0.093 \text{ m}}$$

$$k_g = 3.2577 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \text{Pa}}$$

Menentukan Koefisien Perpindahan Massa Sisi Cairan (K_L)

$$kl = \sqrt{\frac{4 \times D_{AL} \times V_{max}}{\pi h}}$$

dimana,

D_{AL} = Difusifitas liquid (m^2/det)

V_{max} = kecepatan liquid max pada aliran (m/s)

h = Panjang area kontak, (m)

ρ_L = Liquid density, (kg/m^3)

μ = Viskositas liquid, ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)

g = Gravity acceleration, (9.80665 m/s^2)

k_L = Koefisien perpindahan massa sisi cairan, ($\text{kmol}/\text{s} \cdot \text{m}^2$)

dimana dibutuhkan:

$$\delta = \left[\frac{3\pi\vartheta}{\rho_L g \pi D} \right]^{1/3}$$

ϑ , laju Larutan = $3.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det}$, sehingga :

$$\delta = \left[\frac{3 \times 3.14 \times 3.33 \times 10^{-6}}{1040.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 3.14 \times 0.013 \text{ m}} \right]^{1/3}$$

$$\delta = 0.00051875 \text{ m}$$

V_{max} dapat diperoleh:

$$V_{max} = \frac{\rho g \delta^2}{2\mu_L}$$

$$V_{max} = \frac{1040.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times (0.00051875 \text{ m})^2}{2 \times 0.0058133 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}$$

$$V_{max} = 0.236123432 \text{ m/s}$$

$$kl = \sqrt{\frac{4 \times D_{AL} \times V_{max}}{\pi h}}$$

$$kl = \sqrt{\frac{4 \times 2.311 \times 10^{-9} \times 0.236123432 \text{ m/s}}{3.14 \times 0.093 \text{ m}}}$$

$$kl = 8.7004 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

Menentukan Konsentrasi CO_2 dalam Interface ($[\text{CO}_2]_i$) dan Konstanta Laju Reaksi Overall Pseudo First Order (k_{ov})

Menentukan nilai K_{ov} menggunakan persamaan (Danckwerts, 1970) :

$$[\text{CO}_2]_i = \frac{k_g P_A + [\text{CO}_2]_e \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \dots\dots\dots (a)$$

$$\frac{Q}{t} = \bar{R} = ([\text{CO}_2]_i - [\text{CO}_2]_e) \sqrt{D_{AL} k_{ov}} \dots\dots\dots (b)$$

dimana,

k_g = Koefisien perpindahan massa sisi gas, (kmol/s.m².Pa)

P_A = Tekanan parsial gas CO_2 , (Pa)

D_{AL} = Koefisien difusi liquid- CO_2 , (m²/det)

H_e = Konstanta Henry, (Pa.m³/kmol)

$[\text{CO}_2]_e$ = Konsentrasi gas CO_2 berkesetimbangan dalam cairan, (kmol/m³)

Misal : $\phi = \sqrt{D_{AL} \times k_{ov}}$

Substitusikan pers (a) → (b)

$$\begin{aligned}
\frac{Q}{t} &= \left(\frac{k_g P_A + [\text{CO}_2]_e \varphi}{k_g H_e + \varphi} - [\text{CO}_2]_e \right) \varphi \\
&= \left(\frac{k_g P_A + [\text{CO}_2]_e \varphi - [\text{CO}_2]_e k_g H_e - [\text{CO}_2]_e \varphi}{k_g H_e + \varphi} \right) \varphi \\
&= \left(\frac{k_g P_A - [\text{CO}_2]_e k_g H_e}{k_g H_e + \varphi} \right) \varphi \\
\frac{Q}{t} k_g H_e + \frac{Q}{t} \varphi &= k_g P_A \varphi - [\text{CO}_2]_e k_g H_e \varphi \\
\varphi &= \frac{\frac{Q}{t} k_g H_e}{k_g P_A - [\text{CO}_2]_e k_g H_e - \frac{Q}{t}} \\
\varphi &= \left(\frac{1.759 \times 10^{-5} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{s}} \times 3.2577 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{s} \cdot \text{Pa}} \times 3.47 \times 10^6 \frac{\text{m}^3 \text{Pa}}{\text{kmol}}}{3.2577 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{s} \cdot \text{Pa}} \times 40530 \text{ Pa} - 1.935 \times 10^{-6} \times 3.2577 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{s} \cdot \text{Pa}} \times 3.47 \times 10^6 \frac{\text{m}^3 \text{Pa}}{\text{kmol}} - 1.759 \times 10^{-5} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{s}}} \right) \\
\varphi &= 1.74 \times 10^{-3} \text{ m/s}
\end{aligned}$$

Maka nilai Kov diperoleh dengan persamaan :

$$\begin{aligned}
\varphi &= \sqrt{D_{AL} x k_{ov}} \\
1.74 \times 10^{-3} \text{ m/s} &= \sqrt{2.31 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} x k_{ov}} \\
k_{ov} &= 1310.655063 \left(\frac{1}{\text{s}} \right)
\end{aligned}$$

Menentukan Apparent Reaction Rate Constant (k_{app})

Menentukan k_{app} dengan terlebih dahulu menentukan K_{MDEA} dan $K_{[\text{OH}^-]}$. K_{MDEA} ditentukan menggunakan persamaan (Ko dan Li, 2000) :

$$\begin{aligned}
k_{MDEA} &= 4,01 \times 10^8 \exp \left(\frac{-5400}{T} \right) \\
k_{MDEA} &= 4,01 \times 10^8 \exp \left(\frac{-5400}{303.15 \text{ K}} \right) \\
k_{MDEA} &= 7.363299294 \text{ m}^3/\text{kmol} \cdot \text{det}
\end{aligned}$$

Selanjutnya menentukan $K_{[\text{OH}^-]}$ menggunakan persamaan (Danckwerts, 1970) :

$$\log_{10} k_{\text{OH}^-} = 13,635 - \frac{2895}{T}$$

$$\log_{10} k_{OH^-} = 13,635 - \frac{2895}{303.15 \text{ K}}$$

$$k_{OH^-} = 12169.4834 \text{ m}^3/\text{kmol}\cdot\text{det}$$

Dari k_{MDEA} dan $k_{[OH^-]}$, dapat menentukan k_{app} menggunakan persamaan :

$$k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-} [OH^-] - k_{MDEA} [MDEA]$$

$$k_{app} = 1310.655063 \left(\frac{1}{s}\right) - (12169.4834 \times 0.0003152) - (7.363299294 \times 3.29594319 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3})$$

$$k_{app} = 1282.55034 \text{ det}^{-1}$$

Pembuktian Regim Reaksi Cepat *Pseudo First Order* :

Kondisi reaksi pada absorpsi CO_2 kedalam larutan MDEA berpromotor umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat pseudo first order dengan ketentuan nilai yaitu $3 < Ha < \frac{1}{2} Ei$ (Danckwerts, 1970; Lin dan Shyu, 1999) :

$$Ha = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L}$$

Dimana,

k_{ov} = Konstanta laju reaksi overall pseudo first order, (det^{-1})

D_{AL} = Diffusivitas CO_2 dalam H_2O , (m^2/det)

D_{BL} = Diffusivitas MDEA dalam H_2O , (m^2/det)

k_L = Koefisien perpindahan massa sisi cairan, ($\text{kmol}/\text{s}\cdot\text{m}^2$)

C_{BO} = Konsentrasi awal reaktan, (kmol/m^3)

Z = Koefisien mol reaktan yang bereaksi dengan 1 mol gas terlarut

$[CO_2]_i$ = Konsentrasi gas CO_2 dalam *interface*, (kmol/m^3)

$$Ha = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L}$$

$$Ha = \frac{\sqrt{1310.655063 \left(\frac{1}{s}\right) \times 2.31058 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}}}{8.70043 \times 10^{-5} \text{ m/s}}$$

$$Ha = 20.00157464$$

Sehingga didapatkan C_{Ai} :

$$C_{Ai} = \frac{k_g P_A + C_{Ae} \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}$$

$$C_{Ai} = \frac{3.257 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \text{Pa}} \times 40530 \text{ Pa} + 1.935 \times 10^{-6} \sqrt{2.31058 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 1310.6551 \left(\frac{1}{\text{s}}\right)}}{3.257 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \text{Pa}} \times 3.47 \times 10^6 \frac{\text{m}^3 \text{Pa}}{\text{kmol}} + \sqrt{2.31058 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 1310.6551 \left(\frac{1}{\text{s}}\right)}}$$

$$C_{Ai} = 1.01105 \times 10^{-2} \text{ kmol/m}^3$$

Setelah itu menghitung E_i :

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}} + \frac{[R_3N]}{z [\text{CO}_2]_i}} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}}$$

$$E_i = \sqrt{\frac{2.31058 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}}{9.52515 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}} + \frac{3.2959 \text{ m}^2/\text{s}}{1.01105 \times 10^{-2} \text{ kmol/m}^3}} \sqrt{\frac{9.52515 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}}{2.31058 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}}}$$

$$E_i = 210.863118$$

Sehingga $0.5E_i = 0.5 \times 210.863118$

$$0.5E_i = 105.4315592$$

Karena hasil yang didapat sudah memenuhi ketentuan yang ada $3 < Ha < \frac{1}{2} E_i$, maka TERBUKTI bahwa reaksi ini berada pada rezim cepat *pseudo first order*.

Menentukan Persamaan Konstanta Laju Reaksi untuk Arginine dan L-Glutamic Acid pada suhu 303.15 K

Dalam menentukan persamaan konstanta laju reaksi untuk Arginine dan L-Glutamic Acid pada suhu 303.15 K menggunakan persamaan :

$$y' = b_1 x_1 + b_2 x_2$$

Dimana :

y' = *kappereance* prediksi tiap variabel suhu

x_1 = Konsentrasi *Arginine* dalam campuran (kmol/m^3)

x_2 = Konsentrasi *L-Glutamic Acid* dalam campuran (kmol/m^3)

b_1 = k_{Arginine} ; b_2 = $k_{\text{L-Glutamic Acid}}$

Menentukan b_1 dan b_2 menggunakan persamaan :

$$\sum y x_1 = b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 \quad (\text{A.1})$$

$$\sum y x_2 = b_1 \sum x_1 x_2 + b_2 \sum x_2^2 \quad (\text{A.2})$$

Tabel A.2 Data Perhitungan k_{app} Prediksi Untuk Suhu 303.15 K

Variabel	x_1	x_2	y	x_1^2	x_2^2	x_1x_2	yx_1	yx_2
1% 1:1	0,0281	0,0333	1282,55	0,00079	0,00111	0,00094	36,14	42,79
1% 1: 2	0,0187	0,0444	2120,84	0,00035	0,00197	0,00083	39,84	94,34
1% 2:1	0,0375	0,02223	3694,65	0,00141	0,00049	$\frac{0,00083}{6}$	138,85	82,2
1% 0:1	0	0,0667	2746,97	0	0,00445	0	0	183,24
1% 1:0	0,0563	0	1708,11	0,00318	0	0	96,31	0
5% 1:1	0,145	0,1717	19926,32	0,02105	0,0295	$\frac{0,02492}{3}$	2891,05	3422,97
5% 1:2	0,0966	0,2288	15739,25	0,00934	0,05238	$\frac{0,02212}{3}$	1521,32	3602,44
5% 2:1	0,1935	0,1146	9477,07	0,03747	0,01313	0,02218	1834,61	1086,08
5% 0:1	0	0,3428	15389,6	0	0,11754	0	0	5276,28
5% 1:0	0,2907	0	15609,7	0,08455	0	0	4539,01	0
TOTAL				0,15816	0,22061	0,07184	11097,16	13790,37

Dari persamaan (A.1) dan persamaan (A.2) dilakukan substitusi dan eliminasi :

$$11097.2 = 0.1581603b_1 + 0.07184b_2 \quad \text{I} \times 0.22061$$

$$13790.4 = 0.0718438b_1 + 0.22061b_2 \quad \text{I} \times 0.07184$$

Sehingga menjadi :

$$2448.16 = 0.0348919b_1 + 0.01585b_2$$

$$990.75 = 0.0051615b_1 + 0.01585b_2 \quad -$$

$$1457.4 = 0.0297304b_1$$

$$b_1 = 49020.7$$

Substitusi b_1 ke persamaan :

$$2448.16 = 0.0348919b_1 + 0.01585b_2$$

$$11097.2 = 0.1581603 \times (49020.7) + 0.07184b_2$$

$$b_2 = 46545.9$$

Diperoleh rumus k_{app} prediksi untuk suhu 303.15 K :

$$y = b_1x_1 + b_2x_2$$

$$k_{app} \text{ prediksi} = 49020.71x_1 + 46545.9x_2$$

Dimana $k_{Arginine}$ sebesar 49020.71 dan $k_{L-Glutamic Acid}$ sebesar 46545.9

Menentukan harga $k_{Arginine}$ dan $k_{L-Glutamic Acid}$:

Harga $k_{Arginine}$ dan $k_{L-Glutamic Acid}$ diperoleh dengan melakukan perhitungan K_{app} Prediksi pada temperatur (303.15 K – 323.15 K)

Tabel A.3 Data $k_{Arginine}$ setiap suhu

Suhu (K)	$k_{Arginine}$	Y	X
		$\ln k_{Arginine}$	$1/T (1/K)$
303,15	49020,71	10,80	0,003299
313,15	119904,24	11,69	0,003193
323,15	233124,84	12,36	0,003095

Tabel A.4 Data $k_{L-Glutamic Acid}$ setiap suhu

Suhu (K)	$k_{L-Glutamic Acid}$	Y	X
		$\ln k_{L-Glutamic Acid}$	$1/T (1/K)$
303,15	46545,88	10,75	0,003299
313,15	89338,82	11,40	0,003193
323,15	199174,62	12,20	0,003095

Nilai Y dan X dari **Tabel A.3** dan **Tabel A.4** digunakan pada program aplikasi *Analisis Toolpak –VBA* pada *Microsoft Excel* sehingga didapatkan:

- $k_{Arginine}$ dalam sistem MDEA-Arginine-L-Glutamic Acid :
 $\ln A = 36.054$
 $E/R = -7647.202$
 $k_{Arginine} = 4.55 \times 10^{15} \exp (-7647.202/T)$
- $k_{L-Glutamic Acid}$ dalam sistem MDEA-Arginine-L-Glutamic Acid :
 $\ln A = 34.171$
 $E/R = -7110.423$
 $k_{L-Glutamic Acid} = 6.92 \times 10^{14} \exp (-7110.423/T)$

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

APPENDIKS B

B.1 Hasil Analisa Menggunakan *CO₂-Analysis Method*

Tabel B.1 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	[CO ₂] awal (mol/L)	[CO ₂] akhir (mol/L)	[CO ₃ ²⁻] akhir (mol/L)	[HCO ₃ ⁻] akhir (mol/L)
303.15	0.05	15.9	12	0.021	0.0411	0.0216	0.0194
313.15	0.05	15.9	9.15	0.021	0.0557	0.0215	0.0342
323.15	0.05	15.9	7.55	0.021	0.0639	0.0183	0.0456

Tabel B.2 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	$[\text{CO}_2]$ awal (mol/L)	$[\text{CO}_2]$ akhir (mol/L)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir (mol/L)	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir (mol/L)
303.15	0.05	15.2	10.75	0.027	0.0513	0.0242	0.0271
313.15	0.05	15.2	9.4	0.027	0.0588	0.0219	0.0369
323.15	0.05	15.2	9.25	0.027	0.0597	0.0179	0.0417

Tabel B.3 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	$[\text{CO}_2]$ awal (mol/L)	$[\text{CO}_2]$ akhir (mol/L)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir (mol/L)	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir (mol/L)
303.15	0.05	16.35	10.55	0.019	0.0504	0.0239	0.0264
313.15	0.05	16.35	10.2	0.019	0.0523	0.0209	0.0312
323.15	0.05	16.35	9.4	0.019	0.0565	0.0176	0.0388

Tabel B.4 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	$[\text{CO}_2]$ awal (mol/L)	$[\text{CO}_2]$ akhir (mol/L)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir (mol/L)	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir (mol/L)
303.15	0.05	16.7	11.35	0.0169	0.0444	0.0225	0.0219
313.15	0.05	16.7	8.5	0.0169	0.059	0.0219	0.037
323.15	0.05	16.7	8.15	0.0169	0.0608	0.018	0.0428

Tabel B.5 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	$[\text{CO}_2]$ awal (mol/L)	$[\text{CO}_2]$ akhir (mol/L)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir (mol/L)	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir (mol/L)
303.15	0.05	16.1	11.7	0.02	0.0426	0.0221	0.0205
313.15	0.05	16.1	10.7	0.02	0.0478	0.0202	0.0275
323.15	0.05	16.1	9.25	0.02	0.0552	0.0175	0.0376

Tabel B.6 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	$[\text{CO}_2]$ awal (mol/L)	$[\text{CO}_2]$ akhir (mol/L)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir (mol/L)	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir (mol/L)
303.15	0.05	18.7	8.13	0.0069	0.0633	0.027	0.0362
313.15	0.05	18.7	7.1	0.0069	0.0688	0.0237	0.0451
323.15	0.05	18.7	3.7	0.0069	0.0869	0.0203	0.0666

Tabel B.7 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	$[\text{CO}_2]$ awal (mol/L)	$[\text{CO}_2]$ akhir (mol/L)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir (mol/L)	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir (mol/L)
303.15	0.05	16.9	7.1	0.0165	0.0688	0.0279	0.0408
313.15	0.05	16.9	5	0.0165	0.08	0.0248	0.0551
323.15	0.05	16.9	4.7	0.0165	0.0816	0.0199	0.0616

Tabel B.8 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	$[\text{CO}_2]$ awal (mol/L)	$[\text{CO}_2]$ akhir (mol/L)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir (mol/L)	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir (mol/L)
303.15	0.05	14.9	6.65	0.0272	0.0712	0.0283	0.0428
313.15	0.05	14.9	5.25	0.0272	0.0786	0.0248	0.0539
323.15	0.05	14.9	4.75	0.0272	0.0813	0.0199	0.0613

Tabel B.9 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	$[\text{CO}_2]$ awal (mol/L)	$[\text{CO}_2]$ akhir (mol/L)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir (mol/L)	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir (mol/L)
303.15	0.05	16.3	6.65	0.0199	0.0718	0.0284	0.0433
313.15	0.05	16.3	5.9	0.0199	0.0758	0.0244	0.0513
323.15	0.05	16.3	4.85	0.0199	0.0814	0.0199	0.0615

Tabel B.10 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	$[\text{CO}_2]$ awal (mol/L)	$[\text{CO}_2]$ akhir (mol/L)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir (mol/L)	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir (mol/L)
303.15	0.05	15.2	5.35	0.0253	0.0775	0.02933	0.0481
313.15	0.05	15.2	3.3	0.0253	0.0884	0.02567	0.0626
323.15	0.05	15.2	2.95	0.0253	0.0902	0.0205	0.0697

Tabel B.11 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada MDEA 40% berat

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	$[\text{CO}_2]$ awal (mol/L)	$[\text{CO}_2]$ akhir (mol/L)	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir (mol/L)	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir (mol/L)
303.15	0.05	16	12.9	0.0217	0.0385	0.02096	0.0176
313.15	0.05	16	12.6	0.0217	0.0402	0.01876	0.0215
323.15	0.05	16	10.4	0.0217	0.0521	0.01725	0.0349

B.2 Hasil Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]_e$

Tabel B.12 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]_e$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1

T (K)	K_w	K_1	K_2	K_3	K_4	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2^-]_e$
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.7×10^8	3.15×10^{-4}	1.94×10^{-6}
313.15	2.88×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^8	3.02×10^{-4}	6.51×10^{-6}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^8	3.21×10^{-4}	1.46×10^{-5}

Tabel B.13 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]_e$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2

T (K)	K_w	K_1	K_2	K_3	K_4	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2^-]_e$
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.7×10^8	2.52×10^{-4}	3.38×10^{-6}
313.15	2.88×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^8	2.86×10^{-4}	7.42×10^{-6}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^8	3.44×10^{-4}	1.25×10^{-5}

Tabel B.14 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]_e$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1

T (K)	K_w	K_1	K_2	K_3	K_4	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2^-]_e$
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.7×10^8	2.57×10^{-4}	3.22×10^{-6}
313.15	2.88×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^8	3.22×10^{-4}	5.58×10^{-6}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^8	3.64×10^{-4}	1.10×10^{-5}

Tabel B.15 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1

T (K)	K_w	K_1	K_2	K_3	K_4	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2]_e$
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.7×10^8	2.91×10^{-4}	2.36×10^{-6}
313.15	2.88×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^8	2.85×10^{-4}	7.48×10^{-6}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^8	3.37×10^{-4}	1.31×10^{-5}

Tabel B.16 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0

T (K)	K_w	K_1	K_2	K_3	K_4	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2]_e$
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.7×10^8	3.04×10^{-4}	2.12×10^{-6}
313.15	2.88×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^8	3.53×10^{-4}	4.49×10^{-6}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^8	3.72×10^{-4}	1.04×10^{-5}

Tabel B.17 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1

T (K)	K_w	K_1	K_2	K_3	K_4	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2]_e$
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.7×10^8	2.11×10^{-4}	5.40×10^{-6}
313.15	2.88×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^8	2.52×10^{-4}	1.03×10^{-5}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^8	2.43×10^{-4}	2.83×10^{-5}

Tabel B.18 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]_e$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2

T (K)	K_w	K_1	K_2	K_3	K_4	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2^-]_e$
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.7×10^8	1.94×10^{-4}	6.61×10^{-6}
313.15	2.88×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^8	2.17×10^{-4}	1.46×10^{-5}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^8	2.59×10^{-4}	2.45×10^{-5}

Tabel B.19 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]_e$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1

T (K)	K_w	K_1	K_2	K_3	K_4	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2^-]_e$
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.7×10^8	1.87×10^{-4}	7.17×10^{-6}
313.15	2.88×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^8	2.21×10^{-4}	1.41×10^{-5}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^8	2.60×10^{-4}	2.43×10^{-5}

Tabel B.20 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]_e$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1

T (K)	K_w	K_1	K_2	K_3	K_4	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2^-]_e$
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.7×10^8	1.85×10^{-4}	7.34×10^{-6}
313.15	2.88×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^8	2.28×10^{-4}	1.29×10^{-5}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^8	2.59×10^{-4}	2.45×10^{-5}

Tabel B.21 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0

T (K)	K_w	K_1	K_2	K_3	K_4	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2]_e$
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.7×10^8	1.72×10^{-4}	8.76×10^{-6}
313.15	2.88×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^8	1.97×10^{-4}	1.83×10^{-5}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^8	2.35×10^{-4}	3.06×10^{-5}

Tabel B.22 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ pada MDEA 40% berat

T (K)	K_w	K_1	K_2	K_3	K_4	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2]_e$
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.7×10^8	3.37×10^{-4}	1.64×10^{-6}
313.15	2.88×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^8	4.20×10^{-4}	2.94×10^{-6}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^8	3.95×10^{-4}	9.11×10^{-6}

B.3 Nilai Konstanta Henry

Tabel B.23 Data Perhitungan Konstanta Henry Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 – 323.15 K

T(K)	$(-d \ln K_h / d(1/T))$	$((1/T)-(1/298))$	$EXP((-d \ln K_h / d(1/T)) \times ((1/T)-(1/298)))$	He_{298} (kmol/m ³ . pa)	$1/He^t$ (mol/cm ³ .pa)	He^t (m ³ .pa/kmol)
303.15	2400	-5.7×10^{-5}	0.872128555	3.30×10^{-7}	2.88×10^{-7}	3.47×10^6
313.15	2400	-1.62×10^{-4}	0.677305727	3.30×10^{-7}	2.24×10^{-7}	4.47×10^6
323.15	2400	-2.61×10^{-4}	0.534298964	3.30×10^{-7}	1.76×10^{-7}	5.67×10^6

B.4 Hasil Perhitungan Diffusivitas

Tabel B.24 Hasil Perhitungan Diffusivitas Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 – 323.15 K

T (K)	$D_{AL} (CO_2-H_2O)$ (m ² /s)	$D_{AG} (CO_2-N_2)$ (m ² /s)	$D_{BL} (MDEA-H_2O)$ (m ² /s)
303.15	2.310×10^{-9}	1.719×10^{-5}	9.525×10^{-10}
313.15	2.923×10^{-9}	1.819×10^{-5}	1.201×10^{-9}
323.15	3.598×10^{-9}	1.923×10^{-5}	1.479×10^{-9}

B.5 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

Tabel B.25 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Sisi Gas Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 - 323.15 K

T (K)	<i>Sc</i>	<i>Re</i>	<i>Sh</i>	k_g (kmol/s.m².Pa)
303.15	0.794965814	716.93905	44.412569	3.25771 x 10 ⁻⁹
313.15	0.799241365	673.73136	42.3194306	3.18066 x 10 ⁻⁹
323.15	0.80310107	634.60569	40.3861865	3.10777 x 10 ⁻⁹

Tabel B.26 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 1% berat promotor komposisi 1:1

T (K)	δ (m)	<i>V max</i> (m/s)	<i>k_L</i> (m/s)
303.15	5.18 x10 ⁻⁴	0.2361	8.644 x 10 ⁻⁵
313.15	4.99 x10 ⁻⁴	0.2451	9.891 x 10 ⁻⁵
323.15	4.93 x10 ⁻⁴	0.2483	1.11 x 10 ⁻⁴

Tabel B.27 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 1% berat promotor komposisi 1:2

T (K)	δ (m)	V_{max} (m/s)	k_L (m/s)
303.15	4.81 x10 ⁻⁴	0.2547	8.9787 x 10 ⁻⁵
313.15	4.59 x10 ⁻⁴	0.2663	1.0309 x 10 ⁻⁴
323.15	4.52 x10 ⁻⁴	0.2705	1.1533 x 10 ⁻⁴

Tabel B.28 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 1% berat promotor komposisi 2:1

T (K)	δ (m)	V_{max} (m/s)	k_L (m/s)
303.15	4.86 x10 ⁻⁴	0.2515	8.9231 x 10 ⁻⁵
313.15	4.66 x10 ⁻⁴	0.2623	1.0231 x 10 ⁻⁴
323.15	4.59 x10 ⁻⁴	0.2665	1.1447 x 10 ⁻⁴

Tabel B.29 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 1% berat promotor komposisi 0:1

T (K)	δ (m)	V_{max} (m/s)	k_L (m/s)
303.15	4.92 x10 ⁻⁴	0.2484	8.868 x 10 ⁻⁵
313.15	4.66 x10 ⁻⁴	0.2626	1.0238 x 10 ⁻⁴
323.15	4.58 x10 ⁻⁴	0.2668	1.1455 x 10 ⁻⁴

Tabel B.30 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 1% berat promotor komposisi 1:0

T (K)	δ (m)	V_{max} (m/s)	k_L (m/s)
303.15	4.73×10^{-4}	0.2588	9.052×10^{-5}
313.15	4.51×10^{-4}	0.2711	1.040×10^{-4}
323.15	4.44×10^{-4}	0.2755	1.164×10^{-4}

Tabel B.31 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 5% berat promotor komposisi 1:1

T (K)	δ (m)	V_{max} (m/s)	k_L (m/s)
303.15	4.88×10^{-4}	0.2505	8.9051×10^{-5}
313.15	4.68×10^{-4}	0.2613	1.0213×10^{-4}
323.15	4.61×10^{-4}	0.2651	1.1417×10^{-4}

Tabel B.32 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 5% berat promotor komposisi 1:2

T (K)	δ (m)	V_{max} (m/s)	k_L (m/s)
303.15	5.12×10^{-4}	0.2388	8.694×10^{-5}
313.15	4.95×10^{-4}	0.2471	9.9313×10^{-5}
323.15	4.90×10^{-4}	0.2498	1.1083×10^{-4}

Tabel B.33 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 5% berat promotor komposisi 2:1

T (K)	δ (m)	V_{max} (m/s)	k_L (m/s)
303.15	4.76×10^{-4}	0.2573	9.0241×10^{-5}
313.15	4.53×10^{-4}	0.2699	1.0378×10^{-4}
323.15	4.46×10^{-4}	0.2741	1.1609×10^{-4}

Tabel B.34 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 5% berat promotor komposisi 0:1

T (K)	δ (m)	V_{max} (m/s)	k_L (m/s)
303.15	4.87×10^{-4}	0.2511	8.9145×10^{-5}
313.15	4.68×10^{-4}	0.2615	1.0215×10^{-4}
323.15	4.61×10^{-4}	0.2654	1.1425×10^{-4}

Tabel B.35 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 5% berat promotor komposisi 1:0

T (K)	δ (m)	V_{max} (m/s)	k_L (m/s)
303.15	4.88×10^{-4}	0.2506	8.9068×10^{-5}
313.15	4.68×10^{-4}	0.2615	1.0215×10^{-4}
323.15	4.61×10^{-4}	0.2655	1.1427×10^{-4}

Tabel B.36 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 40% berat MDEA

T (K)	δ (m)	V_{max} (m/s)	k_L (m/s)
303.15	5.40×10^{-4}	0.2268	8.4728×10^{-5}
313.15	5.24×10^{-4}	0.2339	9.6624×10^{-5}
323.15	5.18×10^{-4}	0.2364	1.0782×10^{-4}

B.6 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s)

Tabel B.37 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 1% berat promotor komposisi 1:1

T (K)	ϕ (m/s)	k_{ov} (1/s)
303.15	1.74×10^{-3}	1310.66
313.15	4.40×10^{-3}	6658.43
323.15	7.54×10^{-3}	15840.19

Tabel B.38 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 1% berat promotor komposisi 1:2

T (K)	ϕ (m/s)	k_{ov} (1/s)
303.15	2.22×10^{-3}	2148.17
313.15	4.00×10^{-3}	5507.59
323.15	5.29×10^{-3}	7795.06

Tabel B.39 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 1% berat promotor komposisi 2:1

T (K)	ϕ (m/s)	k_{ov} (1/s)
303.15	2.93×10^{-3}	3722.05
313.15	4.09×10^{-3}	5761.91
323.15	6.15×10^{-3}	10550.53

Tabel B.40 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 1% berat promotor komposisi 0:1

T (K)	ϕ (m/s)	k_{ov} (1/s)
303.15	2.53×10^{-3}	2774.78
313.15	5.73×10^{-3}	11279.24
323.15	7.79×10^{-3}	16943.07

Tabel B.41 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 1% berat promotor komposisi 1:0

T (K)	ϕ (m/s)	k_{ov} (1/s)
303.15	2.00×10^{-3}	1736.08
313.15	3.32×10^{-3}	3776.99
323.15	5.74×10^{-3}	9178.61

Tabel B.42 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 5% berat promotor komposisi 1:1

T (K)	ϕ (m/s)	k_{ov} (1/s)
303.15	6.79×10^{-3}	19953.871
313.15	1.04×10^{-2}	37013.881
323.15	2.24×10^{-2}	140072.173

Tabel B.43 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 5% berat promotor komposisi 1:2

T (K)	ϕ (m/s)	k_{ov} (1/s)
303.15	6.03×10^{-3}	15766.573
313.15	1.09×10^{-2}	40534.640
323.15	1.47×10^{-2}	60392.869

Tabel B.44 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 5% berat promotor komposisi 2:1

T (K)	ϕ (m/s)	k_{ov} (1/s)
303.15	4.69×10^{-3}	9504.361
313.15	7.69×10^{-3}	20349.625
323.15	1.07×10^{-2}	32141.508

Tabel B.45 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 5% berat promotor komposisi 0:1

T (K)	ϕ (m/s)	k_{ov} (1/s)
303.15	5.96×10^{-3}	15416.795
313.15	8.77×10^{-3}	26421.862
323.15	1.33×10^{-2}	49497.483

Tabel B.46 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 5% berat promotor komposisi 1:0

T (K)	ϕ (m/s)	k_{ov} (1/s)
303.15	6.01×10^{-3}	15636.920
313.15	1.07×10^{-2}	39471.080
323.15	1.46×10^{-2}	59726.429

Tabel B.47 Hasil Perhitungan ϕ (m/s) dan k_{ov} (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 40% berat MDEA

T (K)	ϕ (m/s)	k_{ov} (1/s)
303.15	1.43×10^{-3}	883.125
313.15	2.05×10^{-3}	1442.102
323.15	4.75×10^{-3}	6296.813

B.7 Hasil Perhitungan k_{MDEA} , $k_{[OH^-]}$ dan k_{app}

Tabel B.48 Hasil Perhitungan k_{MDEA} dan $k_{[OH^-]}$ pada Temperatur 303.15 - 323.15 K

T (K)	k_{MDEA}	$k_{[OH^-]}$
303.15	7.3633	12169.483
313.15	13.0051	24560.043
323.15	22.1750	47458.289

Tabel B.49 Hasil Perhitungan $k_{apparence}$ konsentrasi 1% berat promotor pada Temperatur 303.15 - 323.15 K

T (K)	$k_{apparence}$				
	1:1	1:2	2:1	0:1	1:0
303.15	1282.550	2120.843	3694.654	2746.979	1708.111
313.15	6608.129	5457.714	5711.121	11229.395	3725.44
323.15	15751.849	7705.654	10460.179	16853.995	9087.828

Tabel B.50 Hasil Perhitungan $k_{apparence}$ konsentrasi 5% berat promotor pada Temperatur 303.15 - 323.15 K

T (K)	$k_{apparence}$				
	1:1	1:2	2:1	0:1	1:0
303.15	19926.319	15739.245	9477.075	15389.602	15609.782
313.15	36963.553	40485.214	20300.039	26372.210	39422.021
323.15	139985.368	60305.369	32053.847	49410.082	59639.864

B.8 Hasil Perhitungan Rezim

Tabel B.51 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 1% berat promotor komposisi 1:1 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	Ha	Cai (kmol/m ³)	Ei	$0.5 Ei$
303.15	20.1303	0.01011	210.8631	105.4316
313.15	44.5259	0.00692	307.3932	153.6966
323.15	68.2434	0.00501	424.0035	212.0017

Tabel B.52 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 1% berat promotor komposisi 1:2 pada Temperatur
303.15 -323.15 K

T (K)	<i>Ha</i>	<i>Cai</i> (kmol/m³)	<i>Ei</i>	<i>0.5 Ei</i>
303.15	24.8131	0.00974	218.6412	109.2306
313.15	38.8538	0.00707	300.8051	150.4026
323.15	45.8651	0.00549	386.3005	193.1503

Tabel B.53 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 1% berat promotor komposisi 2:1 pada Temperatur
303.15 -323.15 K

T (K)	<i>Ha</i>	<i>Cai</i> (kmol/m³)	<i>Ei</i>	<i>0.5 Ei</i>
303.15	32.8651	0.00926	229.9956	114.9978
313.15	40.0432	0.00704	302.4076	151.2038
323.15	53.7582	0.00529	400.9212	200.4606

Tabel B.54 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 1% berat promotor komposisi 0:1 pada Temperatur
303.15 -323.15 K

T (K)	<i>Ha</i>	<i>Cai</i> (kmol/m³)	<i>Ei</i>	<i>0.5 Ei</i>
303.15	28.5527	0.09532	223.4544	111.7272
313.15	55.9891	0.00646	329.0123	164.5061
323.15	68.0786	0.00496	428.1809	214.0905

Tabel B.55 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 1% berat promotor komposisi 1:0 pada Temperatur
303.15 -323.15 K

T (K)	<i>Ha</i>	<i>Cai</i> (kmol/m³)	<i>Ei</i>	<i>0.5 Ei</i>
303.15	22.1259	0.00991	215.1624	107.5812
313.15	31.8906	0.00735	289.7050	144.8525
323.15	49.3091	0.00539	394.1047	197.0523

Tabel B.56 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 5% berat promotor komposisi 1:1 pada Temperatur
303.15 -323.15 K

T (K)	<i>Ha</i>	<i>Cai</i> (kmol/m³)	<i>Ei</i>	<i>0.5 Ei</i>
303.15	76.2490	0.00729	300.3192	150.1596
313.15	101.6756	0.00524	417.2499	208.6249
323.15	196.3904	0.00316	690.8819	345.4409

Tabel B.57 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 5% berat promotor komposisi 1:2 pada Temperatur
303.15 -323.15 K

T (K)	<i>Ha</i>	<i>Cai</i> (kmol/m³)	<i>Ei</i>	<i>0.5 Ei</i>
303.15	69.4178	0.00761	287.6682	143.8351
313.15	109.4197	0.00514	424.9353	212.4677
323.15	132.8476	0.00390	559.1673	279.5837

Tabel B.58 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 5% berat promotor komposisi 2:1 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	<i>Ha</i>	<i>Cai</i> (kmol/m³)	<i>Ei</i>	<i>0.5 Ei</i>
303.15	51.9299	0.00823	265.8000	132.9000
313.15	74.1888	0.00588	372.1661	186.0831
323.15	92.5189	0.00445	491.5908	245.7954

Tabel B.59 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 5% berat promotor komposisi 0:1 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	<i>Ha</i>	<i>Cai</i> (kmol/m³)	<i>Ei</i>	<i>0.5 Ei</i>
303.15	66.9515	0.00764	286.1536	143.0768
313.15	85.8807	0.00561	389.2183	194.6091
323.15	116.6664	0.00408	534.5419	267.2709

Tabel B.60 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 5% berat promotor komposisi 1:0 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	<i>Ha</i>	<i>Cai</i> (kmol/m³)	<i>Ei</i>	<i>0.5 Ei</i>
303.15	67.4857	0.00762	288.0252	144.0126
313.15	104.9708	0.00517	423.5626	211.7813
323.15	128.1376	0.003917	558.9274	279.4637

Tabel B.61 Hasil Perhitungan Rezim 40% berat MDEA pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	<i>Ha</i>	<i>Cai</i> (kmol/m³)	<i>Ei</i>	<i>0.5 Ei</i>
303.15	16.8595	0.01036	206.4361	103.2181
313.15	21.2130	0.00792	269.5388	134.7694
323.15	44.0943	0.00563	378.4771	189.2385

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

APPENDIKS C

C.1 Data Gas *inlet*

- P = 101325 Pa
- V = 0,0001 m³/det
- R = 8314 m³ · Pa/kmol.K
- T_o = 303,15 K
- n = 4.02 x 10⁻⁶

C.2 Data Mol Gas Terabsorb

Tabel C.1 Data Mol Gas Terabsorb untuk Konsentrasi 1% berat Promotor pada Suhu 303.15 - 323.15 K (kmol/det)

T(K)	1% 1:1	1% 1:2	1% 2:1	1% 0:1	1% 1:0
303.15	6.68 x 10 ⁸	8.24 x 10 ⁸	1.03 x 10 ⁷	9.16 x 10 ⁸	7.53 x 10 ⁸
313.15	1.16 x 10 ⁷	1.07 x 10 ⁷	1.09 x 10 ⁷	1.40 x 10 ⁷	9.25 x 10 ⁸
323.15	1.43 x 10 ⁷	1.10 x 10 ⁷	1.24 x 10 ⁷	1.46 x 10 ⁷	1.17 x 10 ⁷

Tabel C.2 Data Mol Gas Terabsorb untuk Konsentrasi 5% berat Promotor pada Suhu 303.15 - 323.15 K (kmol/det)

T(K)	5% 1:1	5% 1:2	5% 2:1	5% 0:1	5% 1:0
303.15	1.88 x 10 ⁷	1.74 x 10 ⁷	1.47 x 10 ⁷	1.73 x 10 ⁷	1.74 x 10 ⁷
313.15	2.06 x 10 ⁷	2.12 x 10 ⁷	1.72 x 10 ⁷	1.86 x 10 ⁷	2.10 x 10 ⁷
323.15	2.67 x 10 ⁷	2.17 x 10 ⁷	1.80 x 10 ⁷	2.05 x 10 ⁷	2.16 x 10 ⁷

Tabel C.3 Data Mol Gas Terabsorb untuk MDEA pada suhu 303.15 - 323.15 K

T(K)	MDEA (kmol/det)
303.15	5.62 x 10 ⁸
313.15	6.16 x 10 ⁸
323.15	1.01 x 10 ⁷

C.3 Data % Recovery

Tabel C.4 %Recovery CO₂ untuk Konsentrasi 1% berat promotor pada suhu 303.15 - 323.15 K

T(K)	1% 1:1	1% 1:2	1% 2:1	1% 0:1	1% 1:0
303.15	1.66	2.05	2.56	2.28	1.87
313.15	2.88	2.67	2.72	3.49	2.30
323.15	3.56	2.74	3.07	3.64	2.92

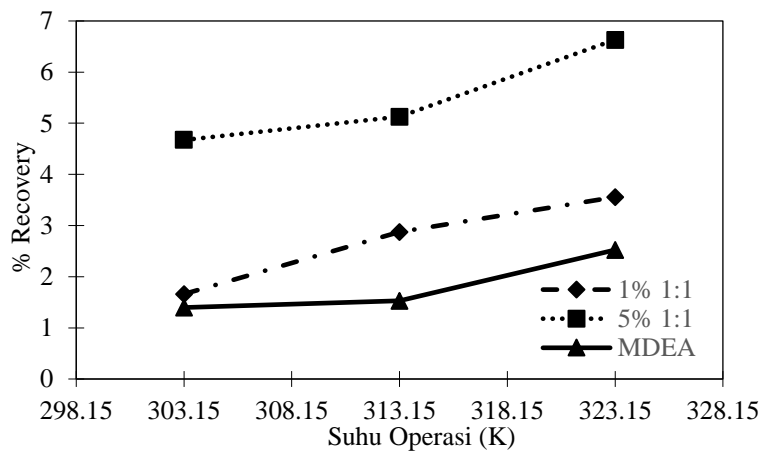
Tabel C.5 %Recovery CO₂ untuk Konsentrasi 5% berat promotor pada suhu 303.15 - 323.15 K

T(K)	5% 1:1	5% 1:2	5% 2:1	5% 0:1	5% 1:0
303.15	4.67	4.33	3.65	4.30	4.32
313.15	5.13	5.26	4.27	4.64	5.22
323.15	6.63	5.39	4.49	5.10	5.37

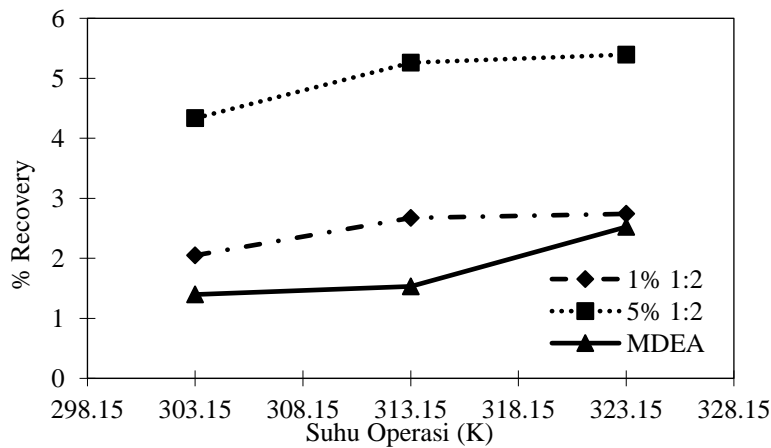
Tabel C.6 %Recovery CO₂ untuk MDEA pada suhu 303.15 - 323.15 K

T(K)	MDEA
303.15	1.40
313.15	1.53
323.15	2.52

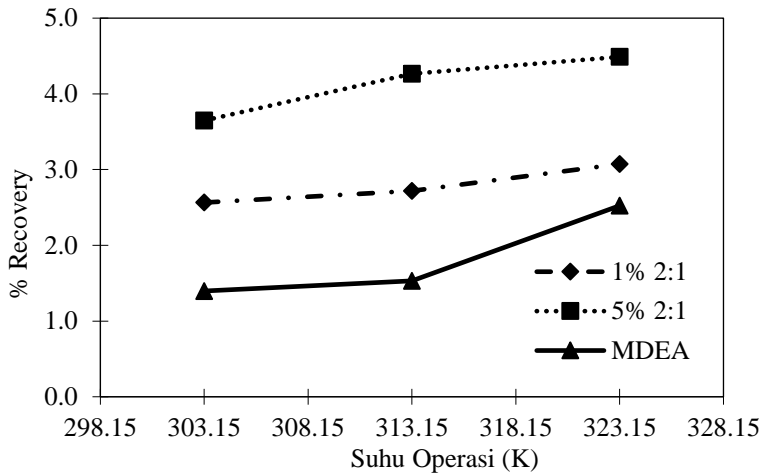
C.4 Grafik %Recovery



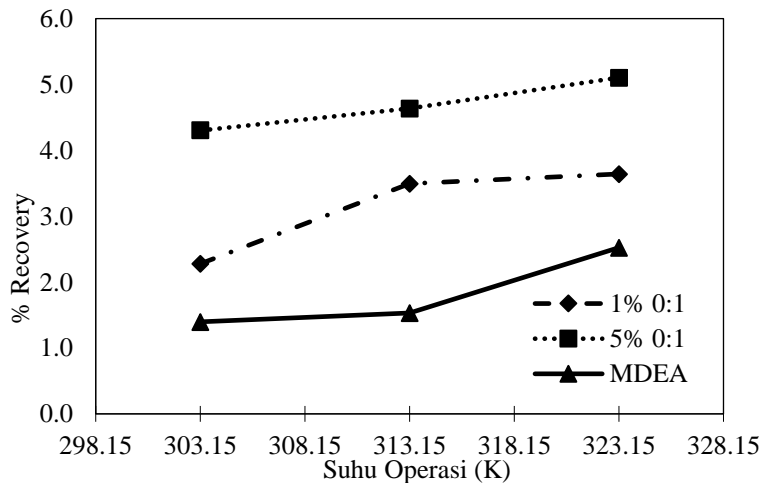
Gambar C.1 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO₂ dengan variasi % berat promotor komposisi 1:1 pada suhu 303.15 – 323.15 K



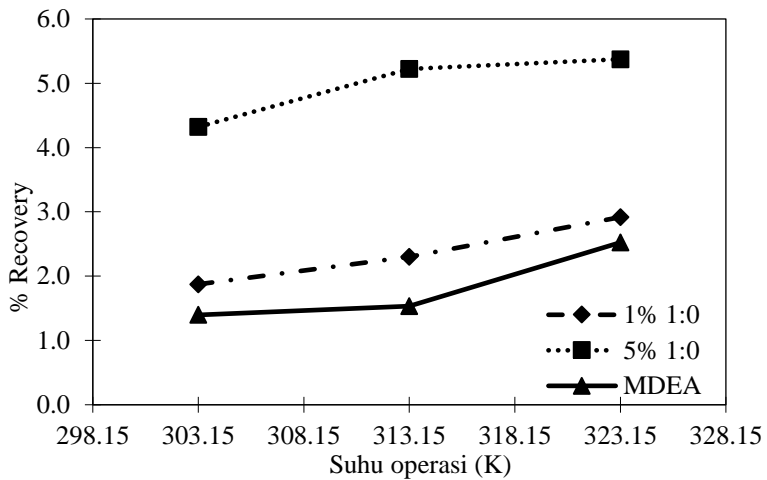
Gambar C.2 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO₂ dengan variasi % berat promotor komposisi 1:2 pada suhu 303.15 – 323.15 K



Gambar C.3 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor komposisi 2:1 pada suhu 303.15 – 323.15 K



Gambar C.4 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor komposisi 0:1 pada suhu 303.15 – 323.15 K



Gambar C.5 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor komposisi 1:0 pada suhu 303.15 – 323.15 K

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Septiani Ayustiningrum dilahirkan di Gresik yang terletak di Propinsi Jawa Timur, pada tanggal 26 September 1995, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuhnya yaitu dimulai di MI. Poemusgri Gresik, SMPN 3 Gresik, dan SMAN 1 Gresik. Pada jenjang perkuliahan penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Kimia angkatan 2013. Penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, dan selanjutnya melakukan penelitian dengan judul **“Studi Kinetika Absorpsi CO₂ ke dalam Larutan MDEA Berpromotor Arginine dan L-Glutamic Acid Menggunakan Watted Wall Column”**

Data Pribadi Penulis

Nama	: Septiani Ayustiningrum
Tempat Tanggal lahir	: Gresik, 26 September 1995
Alamat	: Jl. RA Kartini 12A/04 Gresik
Telp	: 085730979547
Email	: septianiyusti@gmail.com

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Muhammad Haikal, penulis dilahirkan di Birmingham, U.K. pada tanggal 25 Februari 1995, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuhnya yaitu dimulai di SDN No. 82 Banda Aceh, MTsN Model Banda Aceh, dan SMAN Modal Bangsa Aceh. Pada jenjang perkuliahan penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Kimia angkatan 2013. Penulis memilih

Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, dan selanjutnya melakukan penelitian dengan judul **“Studi Kinetika Absorpsi CO₂ ke dalam Larutan MDEA Berpromotor Arginine dan L-Glutamic Acid Menggunakan Watted Wall Column”**

Data Pribadi Penulis

Nama	: Muhammad Haikal
Tempat Tanggal lahir	: Birmingham, U.K., 25 Februari 1995
Alamat	: Jln Tgk Dibitai, No. 25, Lampineung, Banda Aceh
Telp	: 085373317144
Email	: muhammadhaikalk53.chemeng.its@ gmail.com